



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

Χημεία Περιβάλλοντος

Ενότητα 3: Ατμοσφαιρική Ρύπανση

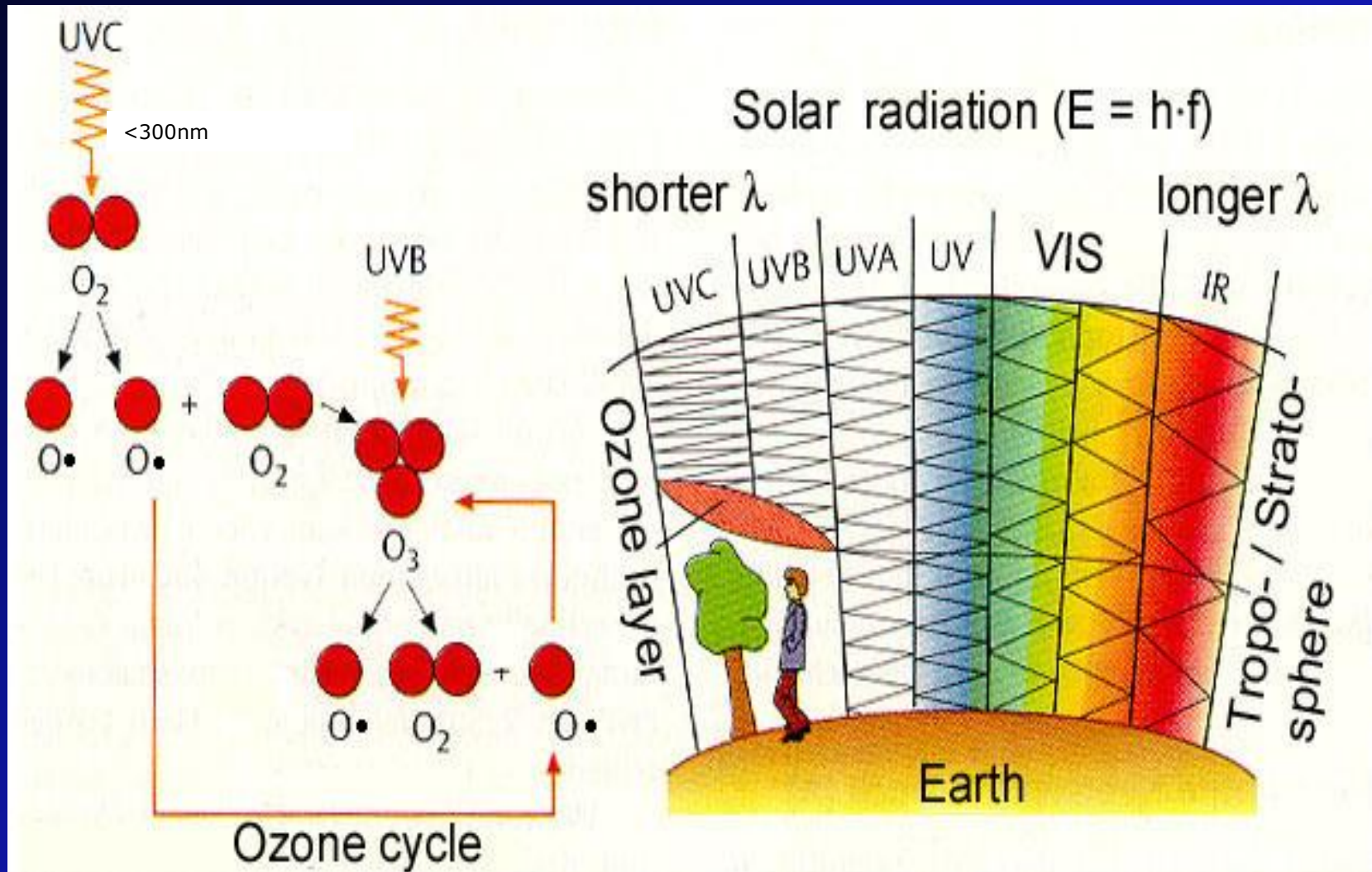
Εμμανουήλ Δασενάκης

Σχολή Θετικών Επιστημών

Τμήμα Χημείας

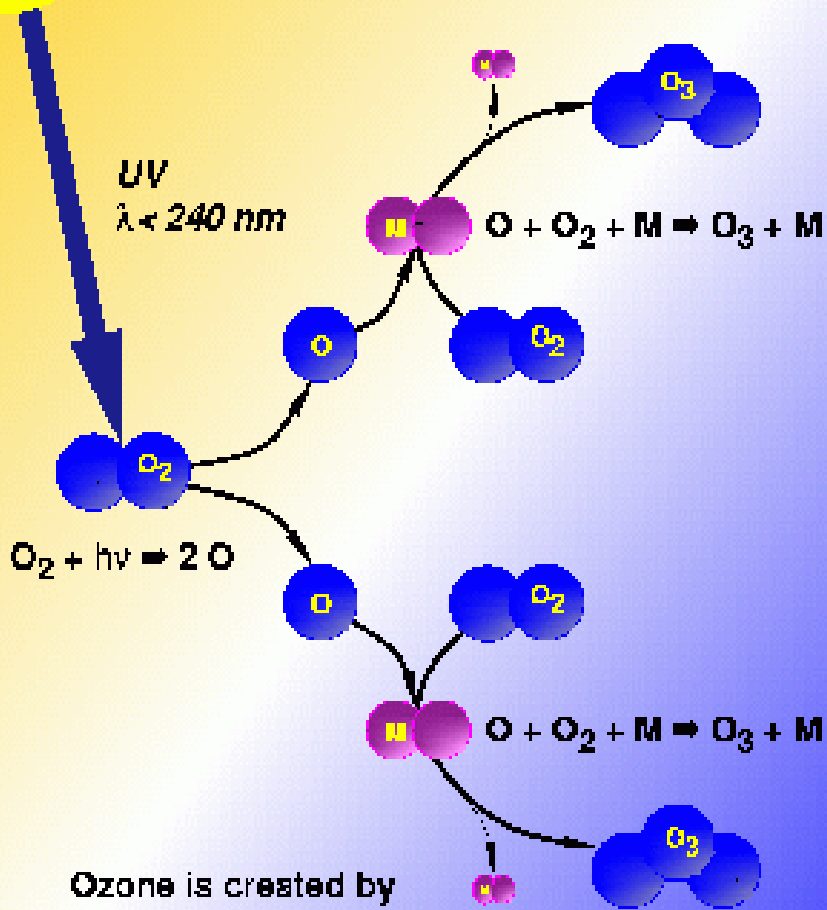
Εργαστήριο Χημείας Περιβάλλοντος

OXYGEN – OZON - O_2 – O_3 – $O\cdot$



SUN

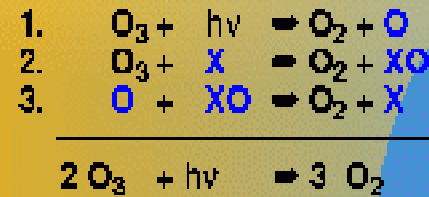
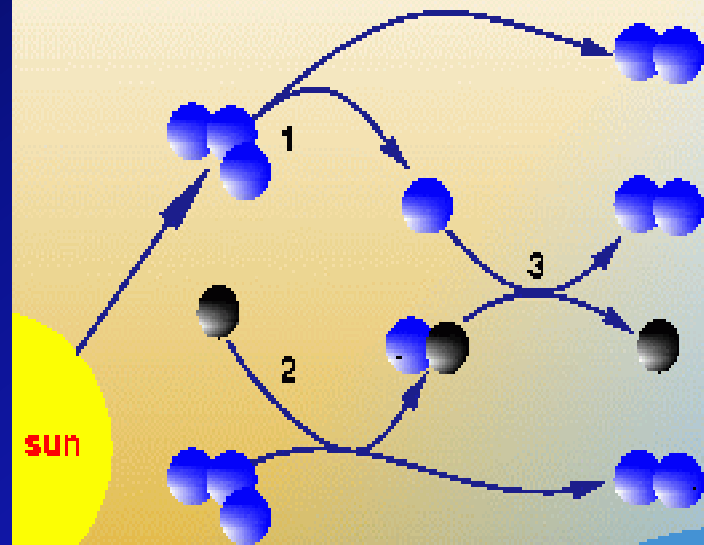
Ozone Production



Ozone is created by oxygen molecules and energetic UV radiation

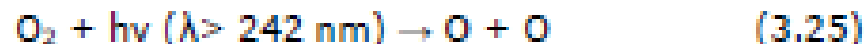
$$3 \cdot \text{O}_2 + h\nu \Rightarrow 2 \cdot \text{O}_3$$

Catalytic Ozone Destruction



OH:HO₂ NO:NO₂ Cl:ClO

Το όζον (O_3) σχηματίζεται, με συνδυασμό των αντιδράσεων φωτοδιάσπασης του διοξυγόνου και αντίδρασης τριών χημικών σωματιδίων.



Η αντίδραση φωτοδιάσπασης (3.25) προκαλείται από τη μικρή ποσότητα της υπεριώδους ακτινοβολίας, που φθάνει στη στρατόσφαιρα, με $\lambda > 242 \text{ nm}$.

Το M είναι ένα τρίτο μόριο, συνήθως το O_2 ή και το N_2 , που είναι απαραίτητο για να προσλάβει την περίσσεια της ενέργειας, η οποία αν δεν απομακρυνθεί θα προκαλέσει τη διάσπαση του όζοντος.

Η συγκέντρωση του όζοντος στην τροπόσφαιρα μεταβάλλεται από 10 - 100 ppb (v/v). Στο σχήμα 2.3 φαίνεται η μεταβολή συγκεντρώσεως όζοντος στην ατμόσφαιρα. Εξαιτίας της αντιδράσεως (3.25) δεν φθάνει στην τροπόσφαιρα ηλιακή ενέργεια με μήκη κύματος μικρότερη από 290 nm.

Το σχηματιζόμενο όζον έχει ενέργεια δεσμού 26 kcal.mol^{-1} και έτσι φωτόνια με μήκη κύματος 315 nm - 1200 nm μπορούν να διασπάσουν το όζον και να παράγουν ατομικό οξυγόνο σε μία βασική ηλεκτρονική κατάσταση:



Το $O(^3P)$ γρήγορα ξανασχηματίζει όζον αντιδρώντας με το O_2 σε μία αντίδραση τριών σωματιδίων: (βλέπε και αντίδραση 3.26).

$$UV_B = 280\text{-}320 \text{ nm}$$



Έτσι, το αποτέλεσμα των δύο αυτών αντιδράσεων (3.27) και, (3.28) είναι ένας μηδενικός κύκλος χωρίς παραγωγή προϊόντος.

Για να κατανοηθεί η μεγάλη σημασία του στρώματος του όζοντος για τη διατήρηση της ζωής, θα υπολογιστεί η ενέργεια ενός φωτονίου (κβάντα ενέργειας) με μήκος κύματος 200 nm και θα συγκριθεί με την ενέργεια ενός χημικού δεσμού. Η ενέργεια του φωτονίου δίδεται από τη σχέση:

$$E = h\nu = h c \lambda^{-1} = (6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}) \cdot (3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}) / 200 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$= 9,94 \cdot 10^{-19} \text{ J} / \text{φωτ}$$

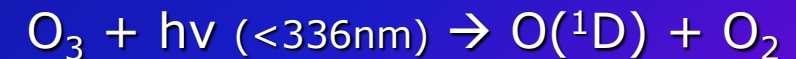
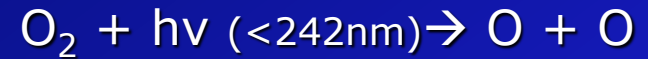
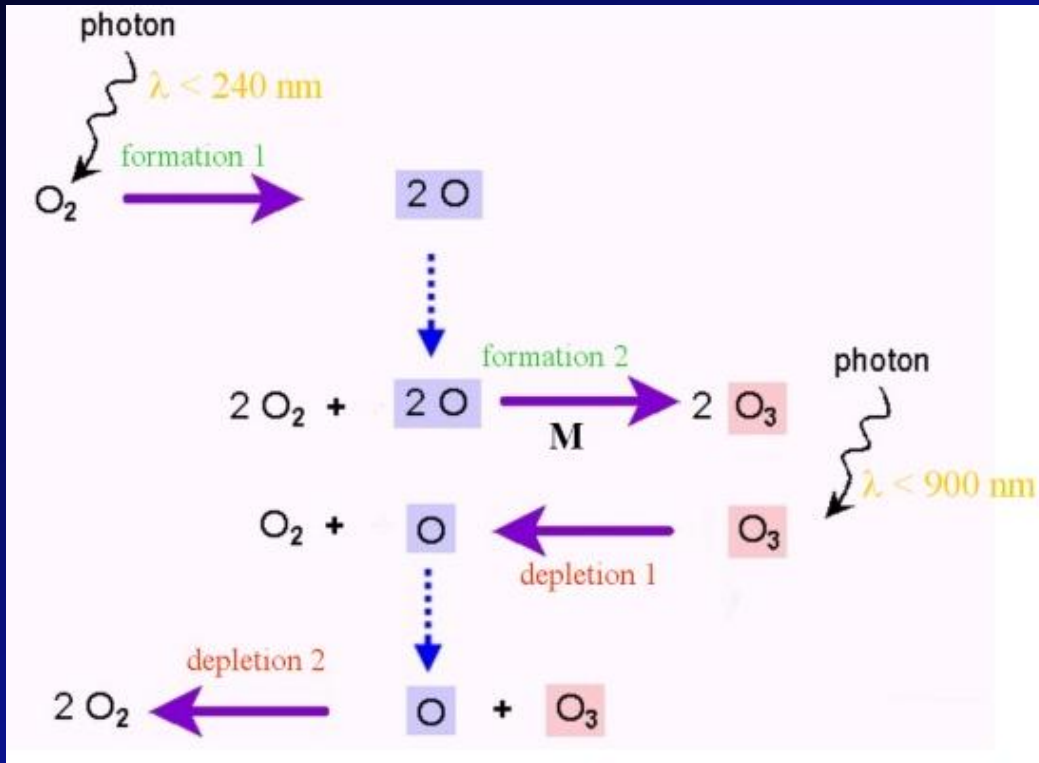
$$1 \text{ mol} - \text{φωτ} = (9,94 \cdot 10^{-19} \text{ J} / \text{φωτ}) \cdot (6,22 \cdot 10^{23} \text{ φωτ} / \text{mol})$$

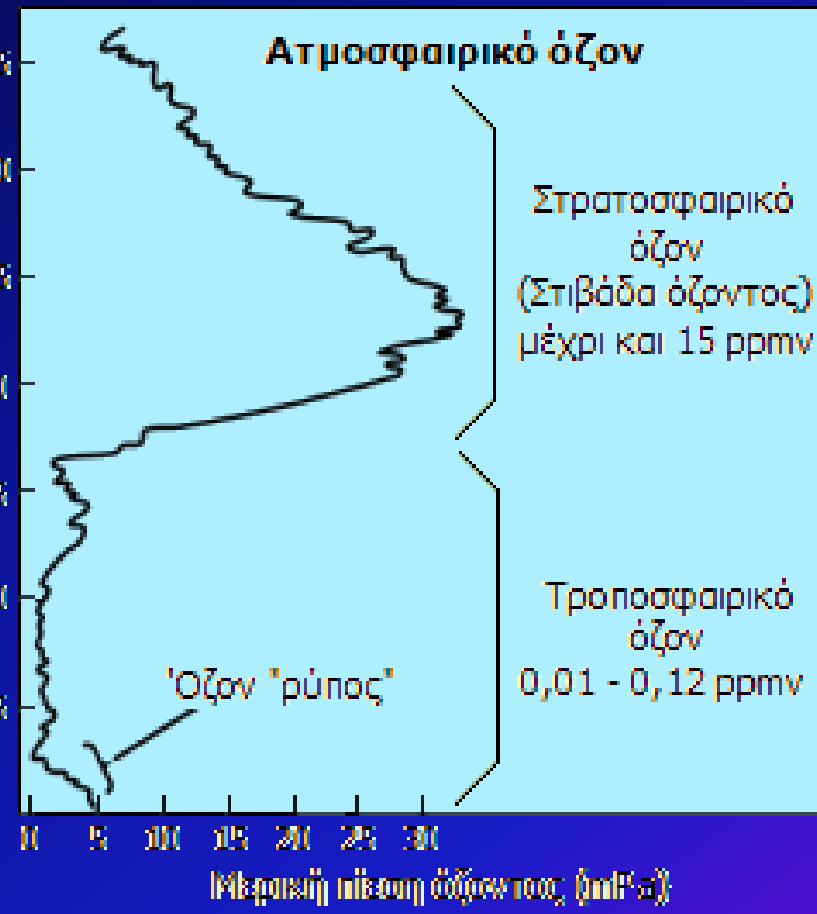
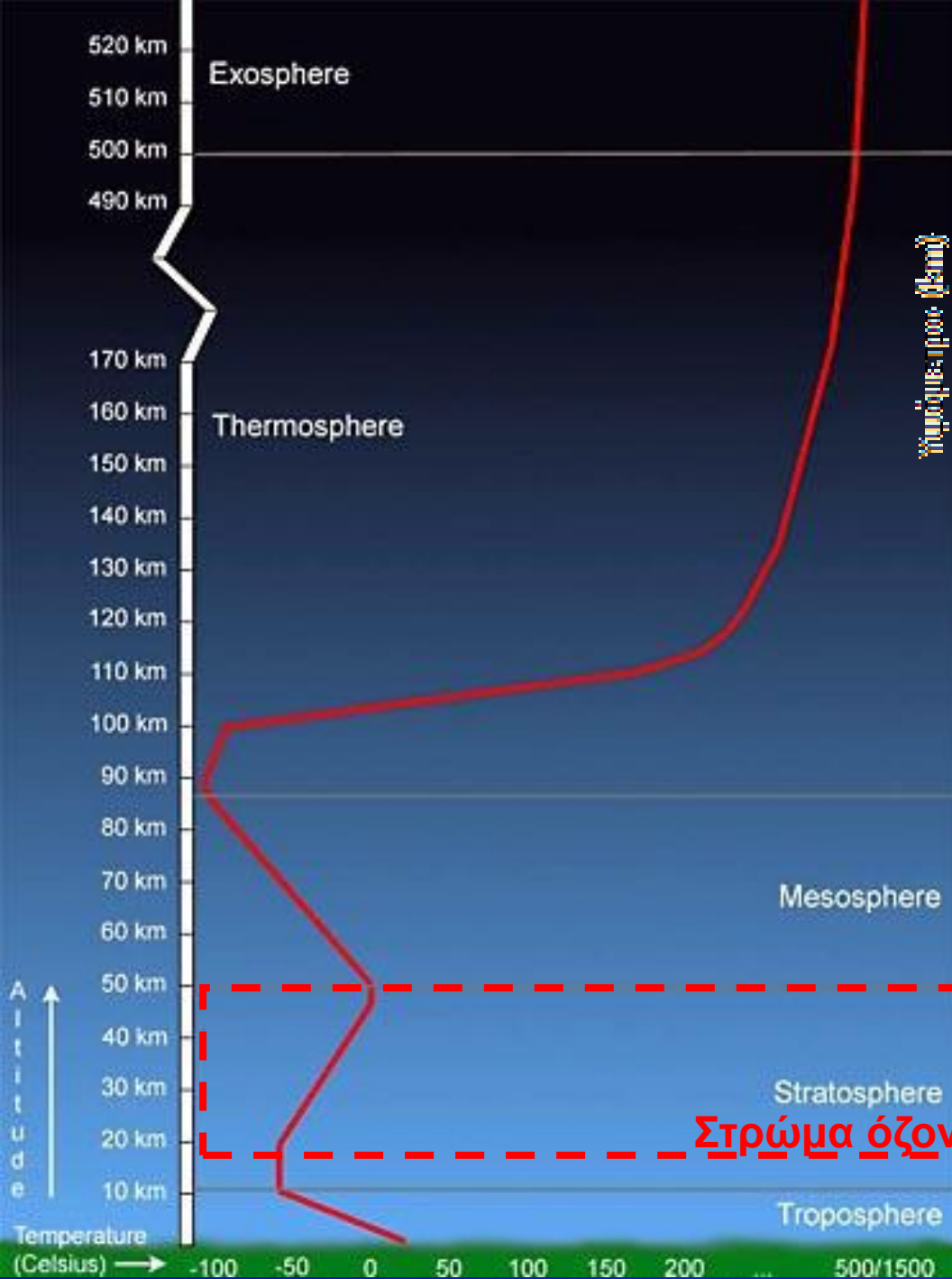
$$= 598 \text{ kJ} / \text{mol}$$

Η ενέργεια που απαιτείται για να σπάσει τους περισσότερους χημικούς δεσμούς είναι μικρότερη από 418 kJ mol^{-1} ($100 \text{ kcal mol}^{-1}$), ($1 \text{ kcal} = 4,184 \text{ kJ}$).

Η ενέργεια δεσμών του μορίου του O_2 είναι 502 kJ mol^{-1} . Επομένως αν έφθανε πάνω στην επιφάνεια της γης ακτινοβολία 200 nm δεν θα μπορούσε να υπάρξει σταθερή χημική ένωση, με συνέπεια την καταστροφή των κυττάρων και των διαφόρων οργανισμών. Ζωή θα μπορούσε να υπάρξει μέσα στο νερό, όπως ακριβώς συνέβαινε πριν το σχηματισμού του στρώματος του όζοντος. Τότε η υπεριώδης ακτινοβολία έφθανε στην επιφάνεια της γης και ζώα υπήρχαν μόνο μέσα στους ωκεανούς.

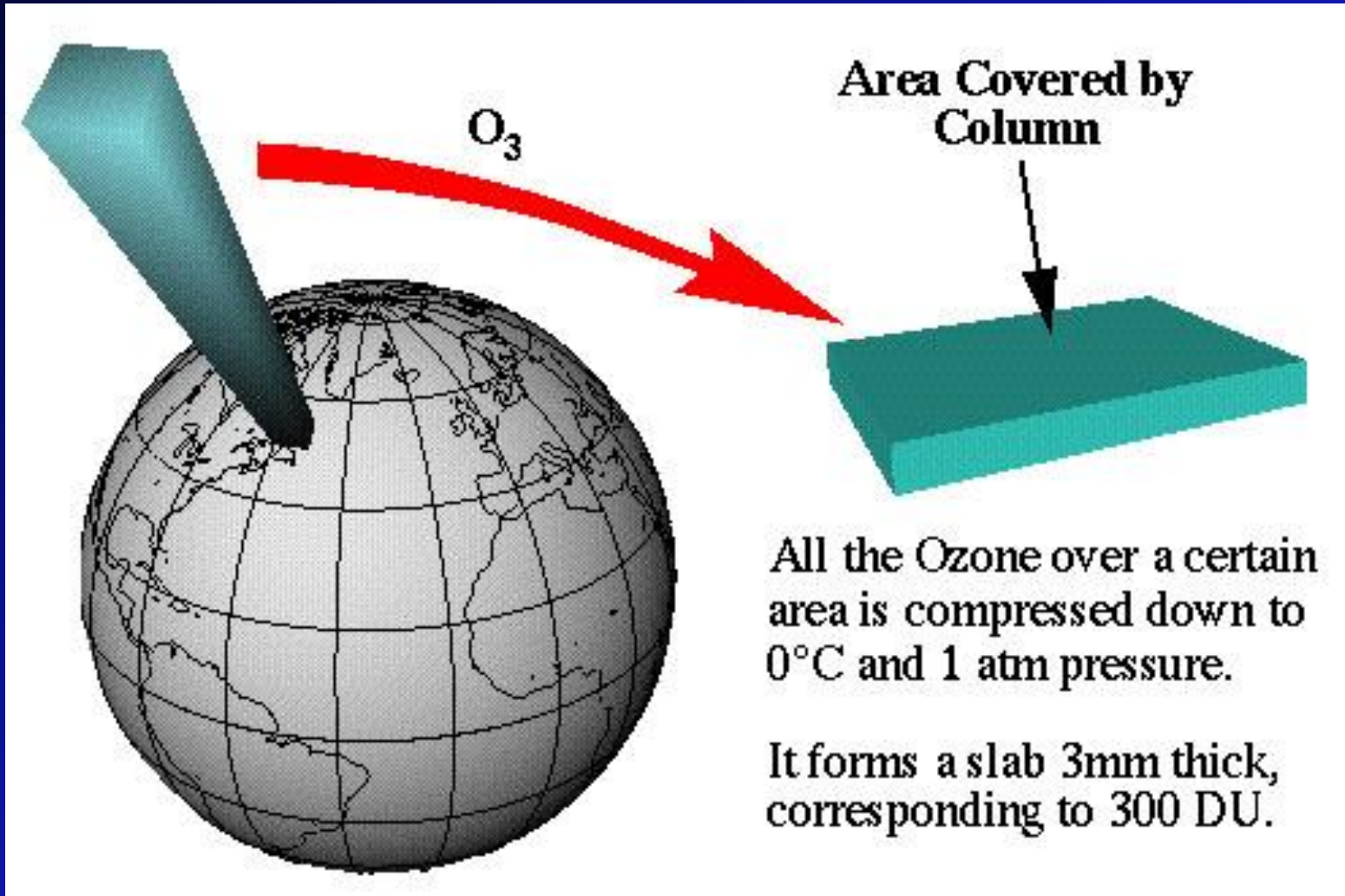
Ο Κύκλος του Chapman






Μονάδα Dobson (Dobson Unit –DU)

Το ύψος του στρώματος καθαρού όζοντος σε μονάδες 10^{-5} m που λαμβάνεται αν διαχωρίζουμε όλο το ατμοσφαιρικό όζον και το συμπιέζουμε σε στήλη σε πίεση 1Atm και θερμοκρασία 273K.



A. Εισαγωγή

- 19^{ος} αιώνα ανακαλύπτεται η σχέση όζοντος με τη Γη
- 20^{ος} αιώνα Fabry, Buisson μετρήσεις όζοντος με UV-φασματοσκοπία
 - 1930 Chapman προτείνει τον κύκλο του όζοντος
 - 1950 Bates, Nicolet συνεισφορά των υδρατμών στο κύκλο του αζώτου
 - 1960 προβλέπεται μηχανισμός καταστροφής του όζοντος
 - 1970 Crutzen ανακαλύπτει το ρόλο των NO_x
 - 1974 Rowland, Molina ανακαλύπτουν το ρόλο των CFC's
 - 1985 πρώτες ενδείξεις «τρύπας του όζοντος» στην Ανταρκτική
-  1995 Βραβείο Nobel Χημείας: Crutzen, Molina and Rowland

14.3 ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ

Η καταστροφή του όζοντος στη στρατόσφαιρα έχει χαρακτηριστεί ως το υπ' αριθμόν 1 παγκόσμιο περιβαλλοντικό πρόβλημα.

Οι αλυσωτές αντιδράσεις αναγέννησης του όζοντος (14.26, 14.27) διακόπτονται, όταν το όζον αντιδράσει με ατομικό οξυγόνο ή ακόμη όταν άτομα οξυγόνου αντιδράσουν μεταξύ τους, παρουσία τρίτου μορίου:

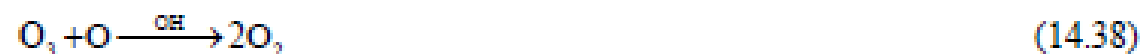


Η τερματική αντίδραση (14.33) καταλύεται, από την παρουσία διαφόρων χημικών σωματιδίων, που σχηματίζονται δευτερογενώς στην τροπόσφαιρα ή εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα από διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες:

α) Ρίζες υδροξυλίου. Η πρωτογενής πηγή παραγωγής ριζών υδροξυλίου στην ατμόσφαιρα οφείλεται στην ευκαιριακή σύγκρουση του ενεργοποιημένου ατομικού οξυγόνου $\text{O}(^1\text{D})$ (αντίδραση 14.28) με υδρατμούς που υπάρχουν στην τροπόσφαιρα:



Η ρίζα OH , ως πολύ δραστική αντιδρά συνήθως με το CO ή CH_4 και απομακρύνεται. Όταν όμως υπάρχει όζον αντιδρά με αυτό προς καταστροφή του:



β) Οξειδίο του αζώτου (NO). Το NO σχηματίζεται στην τροπόσφαιρα με την αντίδραση του O(¹D) με το N₂O που προέρχεται από διάφορες ανθρώπινες και φυσικές πηγές (απονιτροποιητικά βακτηρίδια εδάφους):



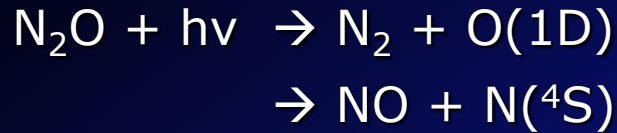
ή εκπέμπεται σ' αυτήν από άλλες φυσικές και κυρίως ανθρώπινες δραστηριότητες. Το NO συμμετέχει στην καταστροφή του όζοντος με τις παρακάτω αντιδράσεις:



Υπολογίζεται ότι με την καταλυτική δράση των OH καταστρέφεται το 11% του όζοντος, ενώ με τη συμμετοχή του NO το ποσοστό της καταστροφής του όζοντος υπολογίζεται στο 50-70%. Πριν από σαράντα χρόνια επικρατούσε η άποψη ότι τα προϊόντα καύσης (H₂O, NO) από τα υπερηχητικά αεροπλάνων ήταν η κύρια αιτία καταστροφής του όζοντος στην στρατόσφαιρα. (Τα υπερηχητικά αεροπλάνα πετούν στα όρια της τροπόσφαιρας και στρατόσφαιρας). Κατά την καύση της βενζίνης, στις συνθήκες που επικρατούν στις μηχανές των υπερηχητικών αεροπλάνων, παράγονται H₂O, αλλά και NO από την ένωση του ατμοσφαιρικού O₂ και N₂ στις υψηλές θερμοκρασίες καύσης.



Ο Κύκλος των ΝΟx



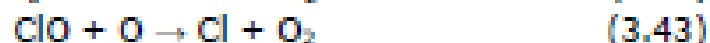
Ποσοστιαία συνεισφορά πηγών στη συγκέντρωση ΝΟx στην ανώτερη ατμόσφαιρα

15-30% από εκπομπές αεροσκαφών

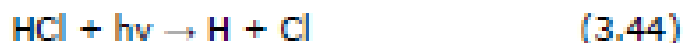
15-25% από πηγές στην επιφάνεια της γης

15-60% από αστραπές (ηλεκτρικός σπινθήρας)

γ) Άτομα χλωρίου, Cl. Προτάθηκε και τρίτος μηχανισμός καταστροφής όζοντος. Η παρακάτω θερματική αντίδραση καταλύεται από άτομα Cl.



Κατ' αρχήν θεωρήθηκε ότι τα άτομα του χλωρίου προέρχονται από τη φωτόλυση του HCl ή του φυσικής προέλευσης μεθυλοχλωριδίου, CH₃Cl:



Αργότερα διαπιστώθηκε ότι η κυριότερη πηγή παραγωγής του Cl₁ είναι τα προωθητικά αέρια (propellant) που χρησιμοποιούνται για τον ψεκασμό (spray) των διαφόρων αερολυμάτων (aerosols). Τα προωθητικά αέρια είναι, γνωστά ως χλωροφθοροάνθρακες (chlorofluorocarbons) με κυριότερους αντιπροσώπους το Freon-11 (CCl₃F και το Freon-12 (CCl₂F₂). Τα Freon κατ' αρχήν χρησιμοποιούνταν μόνο για τα ψυκτικά μηχανήματα, για συσκευές κλιματισμού, ενώ σήμερα χρησιμοποιούνται εκτεταμένα για ψεκασμούς, για αποσμητικά, για πλαστικά για βαφές, κ.ά.

Σε ύψος 20-30 km η υπεριώδης ακτινοβολία (λ < 230 nm) προκαλεί φωτοδιάσπαση των μορίων Freon:



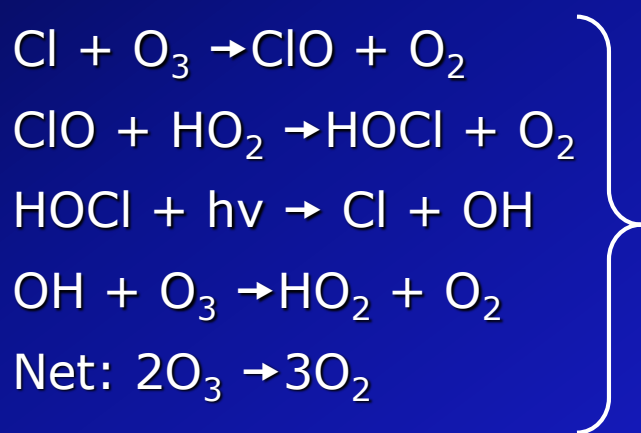
Η δυσμενής παρουσία των χλωροφθοροανθράκων (chlorofluorocarbons) στην τροπόσφαιρα οφείλεται, στους μεγάλους χρόνους ζωής τους. Υπολογίστηκε ότι, η διάρκεια ζωής στην τροπόσφαιρα του CCl₃F > 10 γ και, του CCl₂F₂ > 40 γ, ενώ στη στρατόσφαιρα οι χρόνοι, ζωής τους μικραίνουν σημαντικά (0,4-1 γ σε ύψος 30 km).

Η ΧΗΜΕΙΑ ΑΕΡΙΑΣ ΦΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΑ

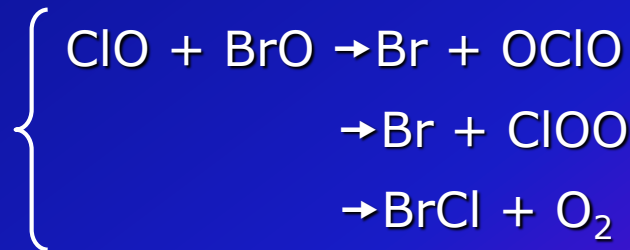
Τα άτομα Cl απελευθερώνονται με φωτόλυση των CFCs, οι οποίες αντιδρούν με μια αλυσίδα καταλυτικών αντιδράσεων που οδηγούν στην καταστροφή του όζοντος



Η απώλεια όζοντος σε χαμηλότερα ύψη γίνεται με το ClO_x και το BrO_x ακολουθώντας τον παρακάτω κύκλο αντιδράσεων:



και



ΧΛΩΡΟΦΘΟΡΑΝΘΡΑΚΕΣ (CFCs)

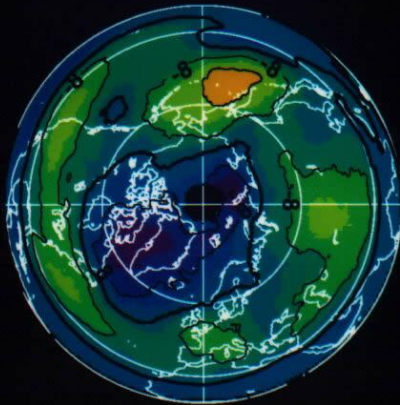
Οι χλωροφθοράνθρακες (CFCs) είναι ενώσεις οι οποίες περιέχουν χλώριο, φθόριο, άνθρακα. Είναι χημικά αδρανείς ενώσεις και για αυτό έχουν μεγάλο χρόνο ζωής.

Συνολικές Πωλήσεις CFCs για χρήση από το 1976 έως το 1992
(σε χιλ τόνους)

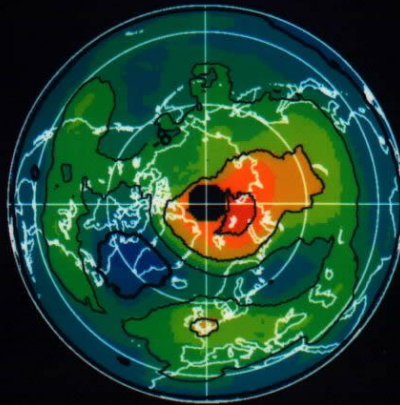
Ένωση	Έτη	Πρωθητικά Αερολυμάτων (aerosol propellant)	Μέσο εμφυσήματος (blowing agent)	Ψυκτικά	Άλλα	Συνολικά
CFC-11	1976	195.0	97.0	26.9	21.0	339.9
	1984	97.5	173.9	23.9	17.0	312.3
	1992	8.2	155.5	17.8	5.0	186.5
CFC-12	1976	237.3	15.0	127.8	30.7	410.8
	1984	121.3	49.5	187.5	24.1	382.1
	1992	14.7	14.3	177.4	9.8	216.2

TOMS total ozone

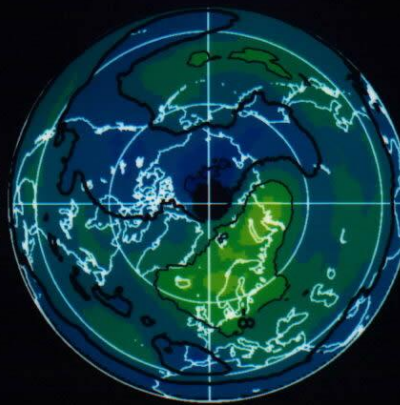
Mar. 89



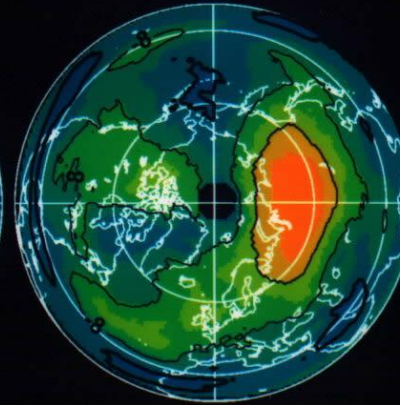
Mar. 90



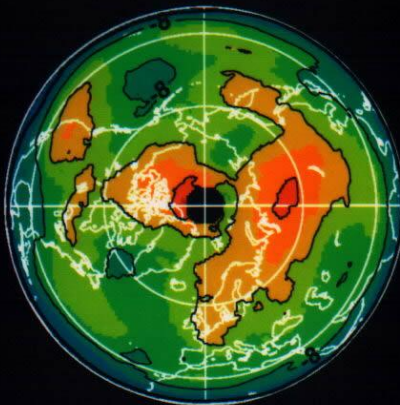
Mar. 91



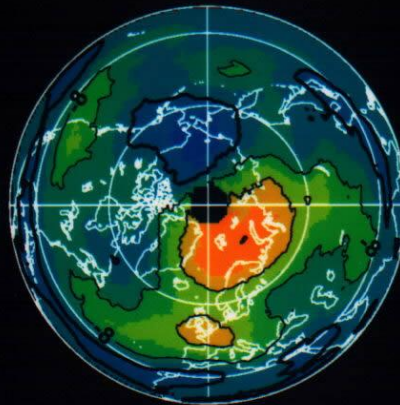
Mar. 92



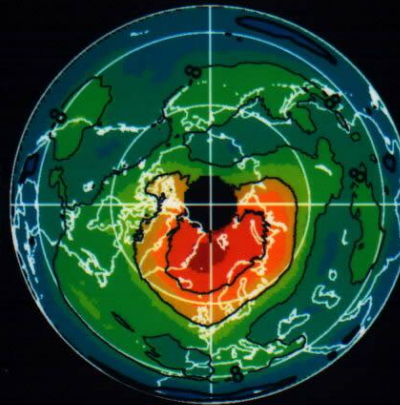
Mar. 93



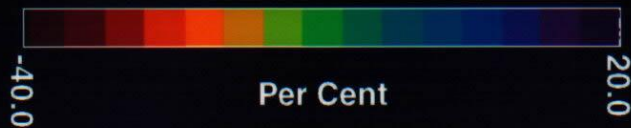
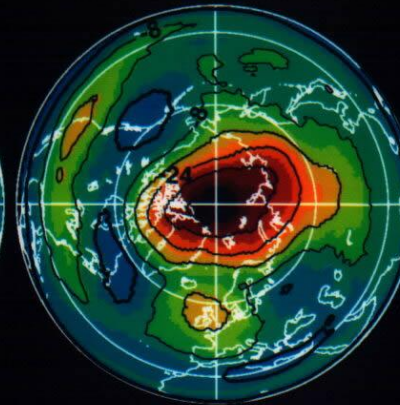
Mar. 94



Mar. 96

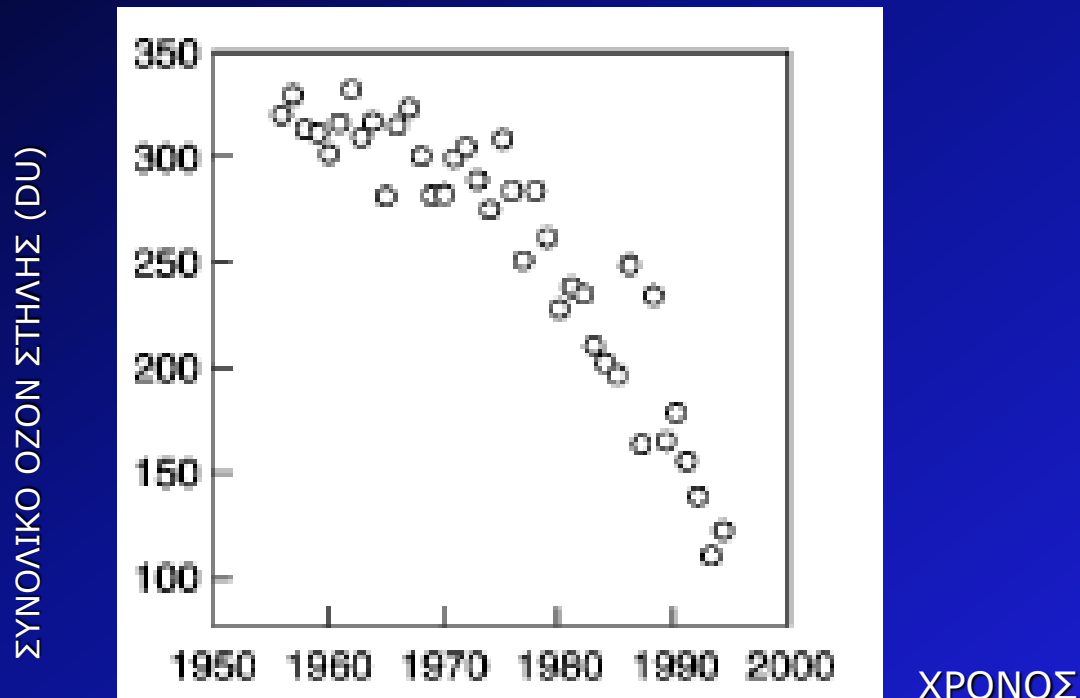


Mar. 97



Climatology = March 1979-82

Η «ΤΡΥΠΑ» ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΑΡΚΤΙΚΗ



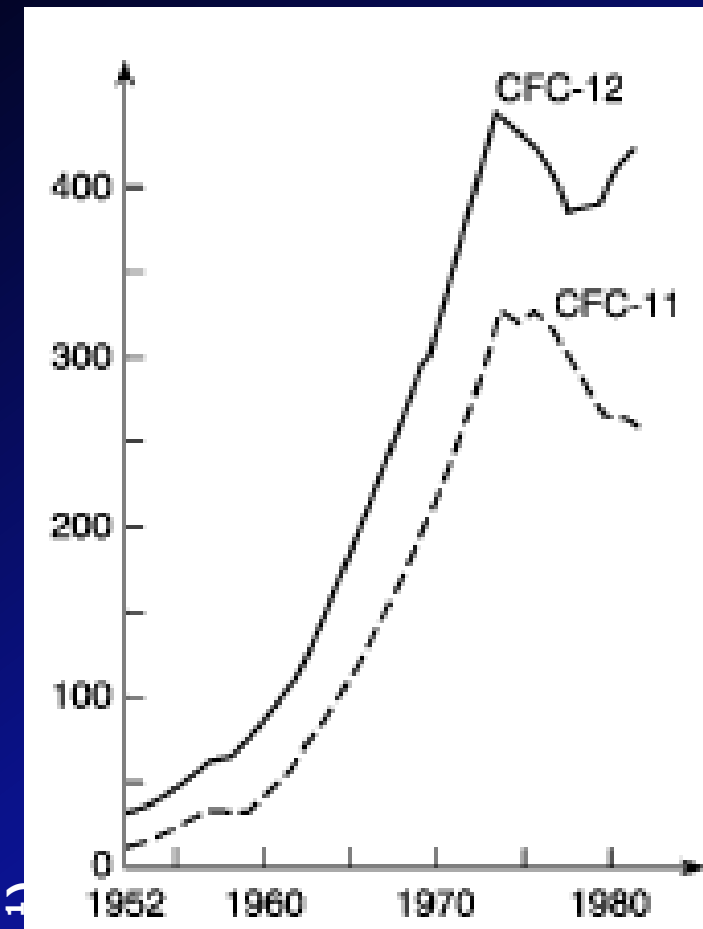
Μέσος όρος στήλης όζοντος ο οποίος μετρήθηκε το μήνα Οκτώβριο στο Halley Bay της Ανταρκτικής από το έτος 1957 έως το 1994.

13.1 Διεθνείς συμβάσεις που καθορίζουν τα επίπεδα εκπομπής των CFCs.

- 1985, Σύμβαση της Βιέννης αναγκαία η λήψη μέτρων για τον περιορισμό της εκπομπής CFCs
- 1987, Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ περιορισμός της παραγωγής και της διάθεσης CFCs

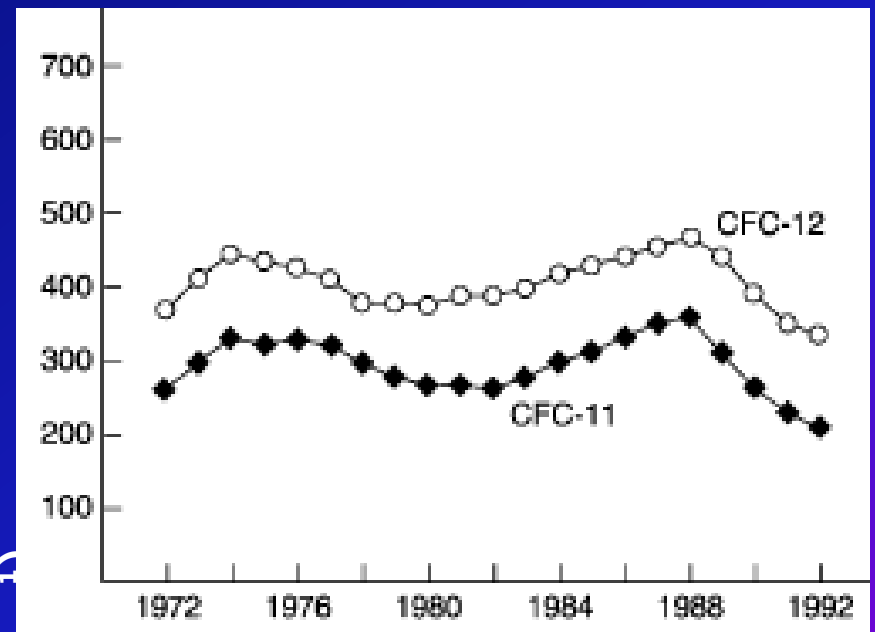
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ CFC-11 ΚΑΙ CFC-12

ΕΤΗΣΙΑ ΕΚΠΟΜΠΗ CFC-11 ΚΑΙ CFC-12 (10^6 KG YR⁻¹)



ΧΡΟΝΙΑ

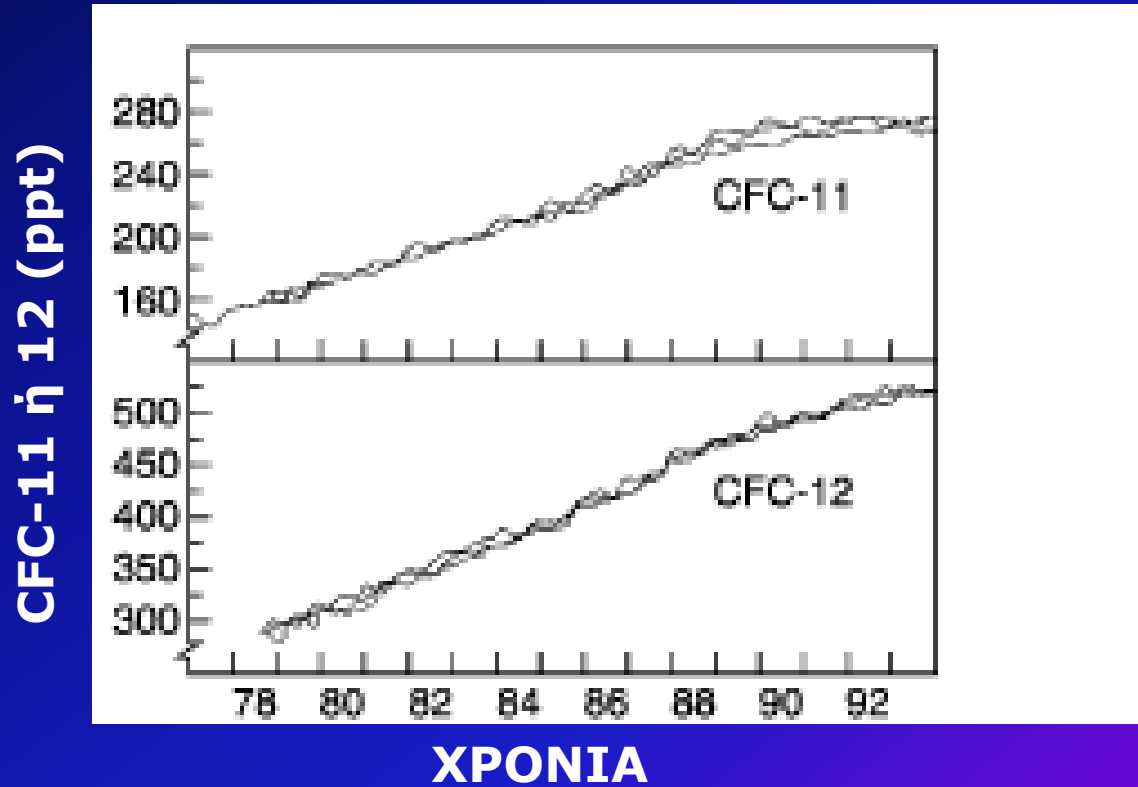
ΕΚΠΟΜΠΕΣ (10^6 KG YR⁻¹)



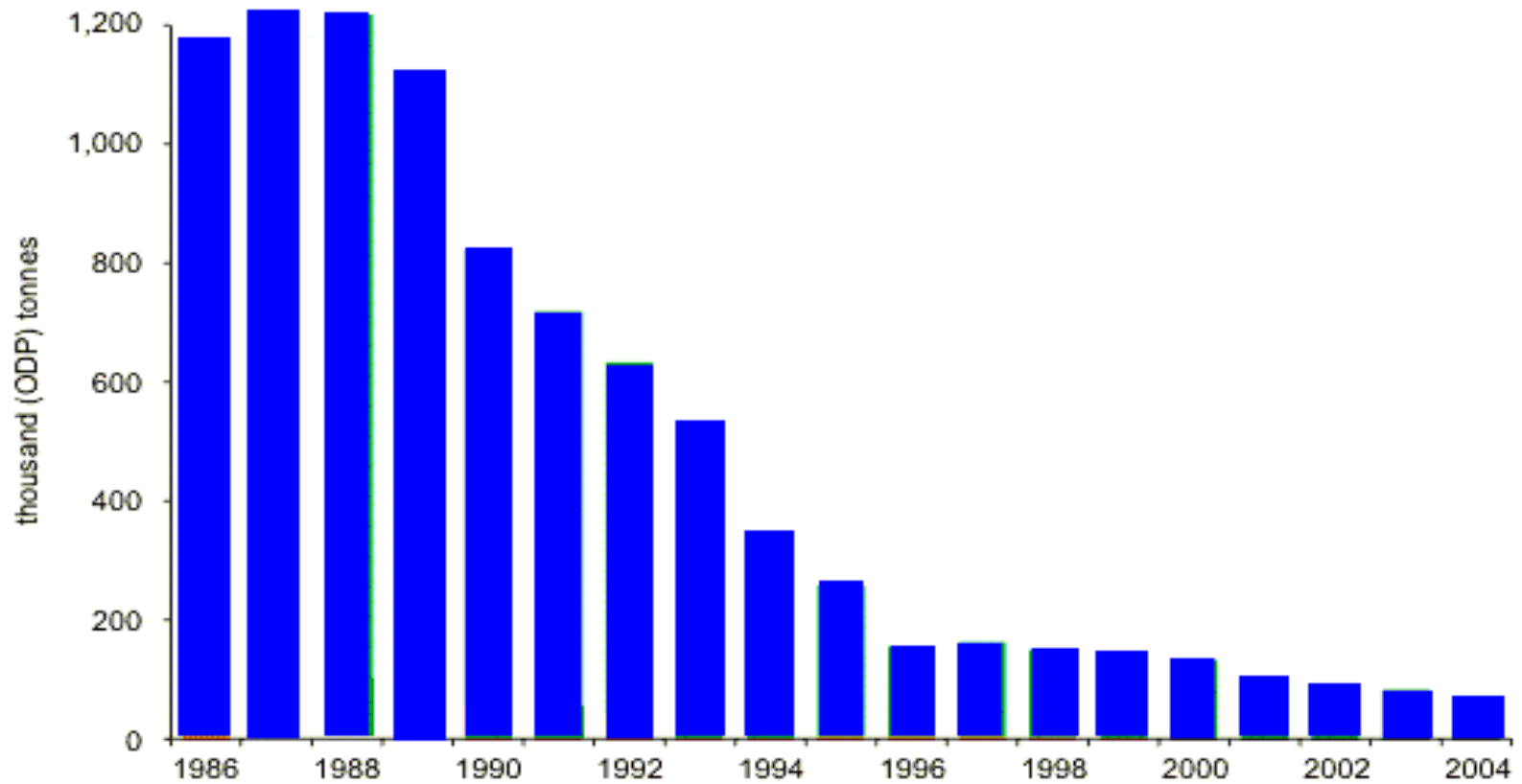
ΧΡΟΝΙΑ

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ CFC-11 ΚΑΙ CFC-12

Συγκεντρώσεις CFC-11 και CFC-12 στον αέρα στην περιοχή 30°N έως 90°N σαν συνάρτηση με τον χρόνο. Οι διαφορετικές καμπύλες παρουσιάζουν μετρήσεις οι οποίες έχουν γίνει σε διαφορετικές θέσεις



Παγκόσμια παραγωγή CFCs



Source: UNEP

Υποκατάστατα των CFCs και χρήσεις τους

13. SCIENTIFIC BASIS FOR CONTROL OF HALOGENATED ORGANICS

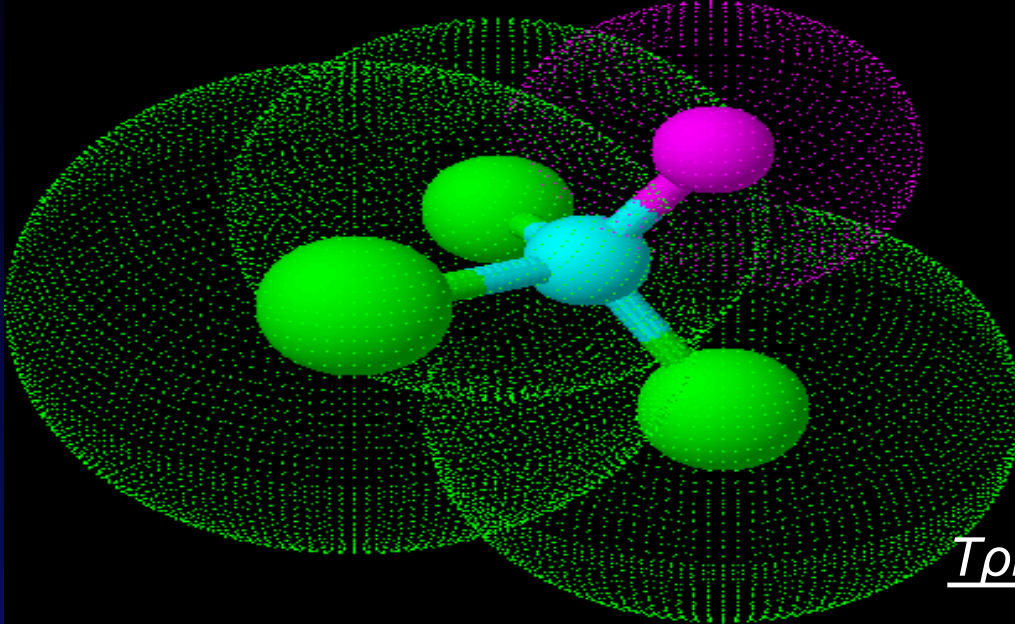
TABLE 13.1 Some CFC Alternates^a

Name ^b	Compound	Use
HFC-134a	CH ₂ FCF ₃	Automobile air conditioners, commercial chillers, residential refrigerators
HFC-125	CHF ₂ CF ₃	Industrial and commercial refrigeration
HFC-152a	CH ₃ CHF ₂	Industrial and commercial refrigeration, aerosol sprays
HCFC-141b	CH ₃ CCl ₂ F	Polyurethane foams, solvent and cleaning applications
HCFC-142b	CH ₃ CF ₂ Cl	Polyurethane foams
HCFC-22	CHClF ₂	Industrial refrigerant, manufacturing of polymers, polystyrene foams, aerosol sprays
HCFC-123	CHCl ₂ CF ₃	Commercial chillers

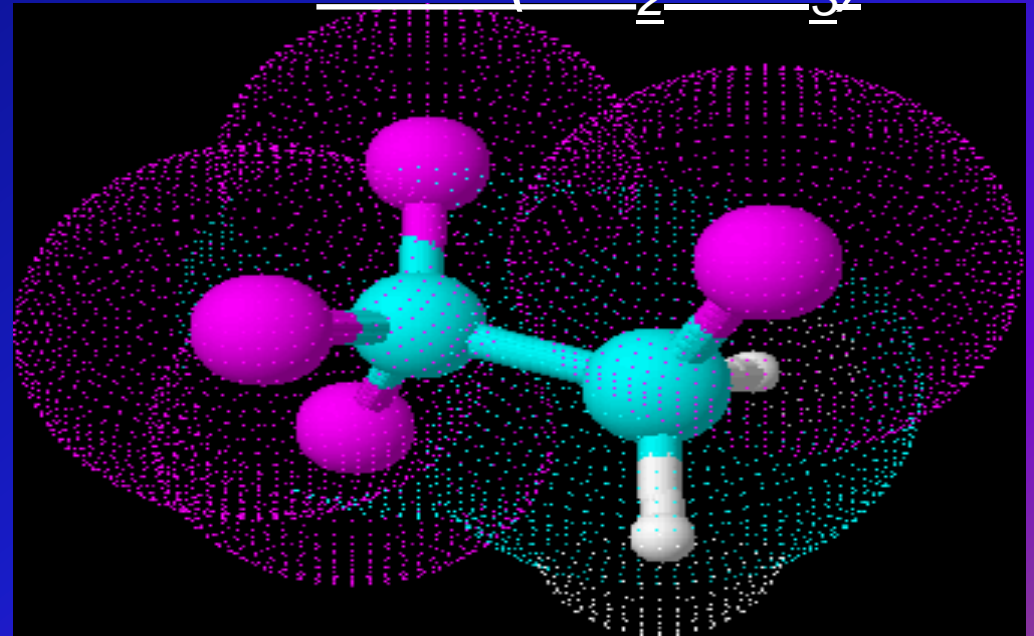
^a From Kirschner (1994); for a discussion of halon replacements, see Freemantle (1995).

^b HFC = hydrofluorocarbon; HCFC = hydrochlorofluorocarbon.

Τρισδιάστατη δομή του CFCl_3 (CFC-11)



Τρισδιάστατη δομή του HFC-
134a (CH_2FCF_3)



ΠΗΓΕΣ ΚΑΙ ΕΤΗΣΙΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ CH₃Br

ΠΗΓΕΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΠΟΣΟ (10 ⁶ kg/ χρόνο)	ΑΝΘΡΩΠΙΝΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ (10 ⁶ kg/χρόνο)	ΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ (10 ⁶ kg/χρόνο)
Ωκεανοί	60-160	0	90
Γεωργία	20-60	35	0
Κάψιμο Βιομάζας	10-50	25	5
Προσθετικά Βενζίνης	0.5-22	1-15	0
Βιομηχανικές Εκπομπές	2	2	0
Δομικοί κατασκευαστικοί σκοποί	4	4	0
Σύνολο	97-298	67-81	95

Η χημεία των $\text{ClO}_x - \text{BrO}_x$

- Στην Ανταρκτική, αύξηση του Br, αυξάνει την καταστροφή του O_3 , μετατρέποντας το ClO σε Cl



Ακολουθεί η φωτόλυση του BrCl

- Καθώς τα Br μειώνονται, μειώνεται και η συνεισφορά του κύκλου των BrO-ClO
- Ωστόσο, η επίδραση στην ολική καταστροφή του O_3 είναι μικρή καθώς αυτή συμβαίνει ακόμα και χωρίς σημαντική συνεισφορά του BrO
- Στην Αρκτική, οι συγκεντρώσεις ClO είναι μικρότερες και ο κύκλος BrO - ClO είναι σημαντικότερος από τον κύκλο ClO-ClO
- Μόνο το 30-50% του O_3 καταστρέφεται σε σχέση με την ολική καταστροφή του O_3 στην Ανταρκτική
- Τα Br παίζουν σημαντικό ρόλο στο ολικό O_3 που καταστρέφεται στην Αρκτική

ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΩΝ ΙΩΔΙΟΥΧΩΝ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΩΝ

- Εκπομπή μέσω βιολογικών διεργασιών των ωκεανών
- Κύρια μορφή : CH_3I (πρόσφατα $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{I}$)
- Γρήγορη φωτόλυση, δε φτάνει στη στρατόσφαιρα, δε συμβάλει στην καταστροφή του O_3
- Συγκεντρώσεις : 0.2 - 0.3 ppt

GEIO

Atmospheric sulfur, SO_2 , H_2S ,
 $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq})$, CS_2 , $(\text{CH}_3)_2\text{S}$



Interchange of atmospheric sulfur species with other environmental spheres

Inorganic SO_4^{2-} in both soluble and insoluble forms

S oxidation

Sulfate reduction

Assimilation by organisms

Elemental sulfur, S

Sulfide oxidation

H₂S oxidation

Biological sulfur, including -SH groups

Decomposition

Sulfides as H_2S and as metal sulfides, such as FeS

Microbial metabolism

Biodegradation

Microbially produced organic sulfur in small molecules, largely as -SH and R-S-R groups

Xenobiotic sulfur such as that in $\begin{array}{c} \text{S} \\ || \\ \text{---P---} \\ | \end{array}$ groups in insecticides

Το θείο στο περιβάλλον παρέχει ένα εξαιρετικό παράδειγμα βιογεωυδροχημικού κύκλου, που περιλαμβάνει τη βιόσφαιρα, τη λιθόσφαιρα, την υδρόσφαιρα καθώς και την ατμόσφαιρα.

Κατά τη δεκαετία του 1960 παρατηρείται συνεχή αύξηση της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου (SO_2) στην ατμόσφαιρα. Υπολογίζεται ότι η συνολική ποσότητα θείου, που ελευθερώνεται από ανθρώπινες δραστηριότητες, είναι διπλάσια της ποσότητας θείου που ελευθερώνεται από φυσικές διεργασίες. Η σχέση αυτή είχε τάση να αυξάνεται όμως στη δεκαετία του 1970 άρχισαν να λαμβάνονται διάφορα μέτρα για την ελάττωση των εκπομπών SO_2 στην ατμόσφαιρα.

Οι κυριότερες πηγές παραγωγής SO_2 είναι:

α) Η καύση των στερεών καυσίμων (γαιάνθρακες, λιθάνθρακες, λιγνίτες) συμμετέχει κατά 60%.

β) Η καύση των υγρών καυσίμων (πετρέλαιο, κηροζίνη, μαζούτ) για παραγωγή ενέργειας, για βιομηχανίες και για κεντρική θέρμανση συμμετέχει περίπου 20%.

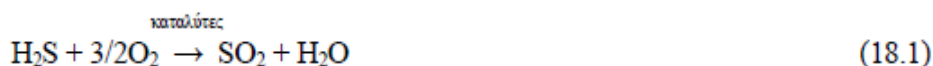
γ) Οι βιομηχανικές διεργασίες για την παραγωγή μετάλλων (Cu, Pb, Zn) από θειούχα ορυκτά συμμετέχουν στο υπόλοιπο 18%

δ) Η συνεισφορά σε SO_2 από κινητές πηγές, π.χ. αυτοκίνητα, είναι μικρή περίπου 2%.

18.2 ΧΗΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΦΩΤΟΧΗΜΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΕΝΩΣΕΩΝ ΘΕΙΟΥ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

18.2.1 Χημικές αντιδράσεις

Το εκλυόμενο H_2S στην ατμόσφαιρα υφίσταται οξείδωση από το οξυγόνο (O_2), το ατομικό οξυγόνο (O) και το όζον (O_3):



Η αντίδραση (18.1) απαιτεί καταλύτη (μεταλλικά σωματίδια) για να λάβει χώρα με ικανοποιητικό ρυθμό. Όλες οι παραπάνω αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα ταχύτερα κατά τα επεισόδια φωτοχημικού νέφους αφού το O , το O_3 και τα σωματίδια υπάρχουν σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σ' αυτές τις συνθήκες.

Κατά την καύση των καυσίμων, που περιέχουν θείο, μπορούν να λάβουν χώρα οι παρακάτω αντιδράσεις:

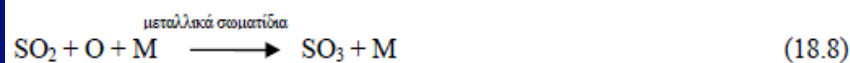


Ο σχηματισμός του SO_3 δεν εξαρτάται, από την περίσσεια οξυγόνου όπως συμβαίνει με την περίπτωση του CO_2 . Ακόμα και στην περίπτωση μεγάλης περίσσειας αέρα, κατά την καύση του θείου σχηματίζεται, σχεδόν αποκλειστικά το SO_2 . Η ποσότητα του σχηματιζόμενου SO_3 εξαρτάται από τις συνθήκες αντίδρασης και κυρίως από τη θερμοκρασία.

Το ποσοστό του SO_3 κυμαίνεται, συνήθως από 1-10% του συνόλου του SO_2 . Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες καύσης σχηματίζεται μεγαλύτερο ποσοστό SO_3 και αυτό παραμένει μόνον, όταν οι υδρατμοί βρίσκονται σε μικρή συγκέντρωση. Σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις υδρατμών σχηματίζονται σταγόνες H_2SO_4 , εντός δευτερολέπτων.



Το SO_2 είναι άκαυστο στον αέρα, υφίσταται όμως φωτοχημική οξείδωση από O , O_2 και πιθανώς O_3 .



Η αντίδραση (18.7) καταλυόμενη από αιωρούμενα μεταλλικά σωματίδια (άλατα σιδήρου, μαγγανίου), αποτελεί το περισσότερο σημαντικό στάδιο για την οξείδωση του SO_2 στην αέρια φάση.

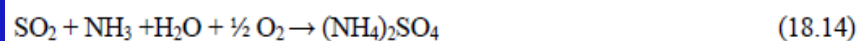
Η οξείδωση του θειώδους οξέος, που σχηματίζεται κατά την αντίδραση SO_2 με υδρατμούς είναι επίσης γρήγορη, ειδικώς παρουσία μεταλλικών αλάτων, που προέρχονται από τα σωματίδια, και βοηθούν στην πυρινοποίηση των σταγόνων βροχής:



Το σχηματιζόμενο H_2SO_4 μπορεί να αντιδράσει με αμμωνία ή μεταλλικά άλατα (π.χ. NaCl από σωματίδια θάλασσας) προς παραγωγή θεικών αλάτων.



Το SO_2 είναι γνωστό ότι σχηματίζει ταχέως θειικά άλατα, με την παρουσία αμμωνίας και υγρού αέρα:



Το θεικό οξύ ή τα θειικά άλατα κατακρημνίζονται με τη βροχή και σχηματίζουν τη λεγόμενη όξινη βροχή (Acid Rain).

Το Σχήμα 18.2 παριστά διαγραμματικώς, τις χημικές διαδικασίες που περιλαμβάνουν διάφορες μορφές περιβαλλοντικού θείου μαζί με τους μέσους χρόνους ζωής της κάθε ένωσης στη χαμηλή ατμόσφαιρα.

Όξινη βροχή

Το H_2SO_3 , το H_2SO_4 , το HNO_2 , το HNO_3 , το HCl , το NH_4HSO_4 και η υδρόλυση του θειικού αμμωνίου ελαττώνουν το pH της βροχής. Έχει παρατηρηθεί και στις ΗΠΑ και στην Ευρώπη όξινη βροχή με pH από 5,0 μέχρι και 2,1.

Συνήθως στα εργοστάσια καύσης μαζούτ και πετρελαίου, για να αποφύγουν τοπική ρύπανση, χρησιμοποιούν καπνοδόχους (chimney) μεγάλου ύψους

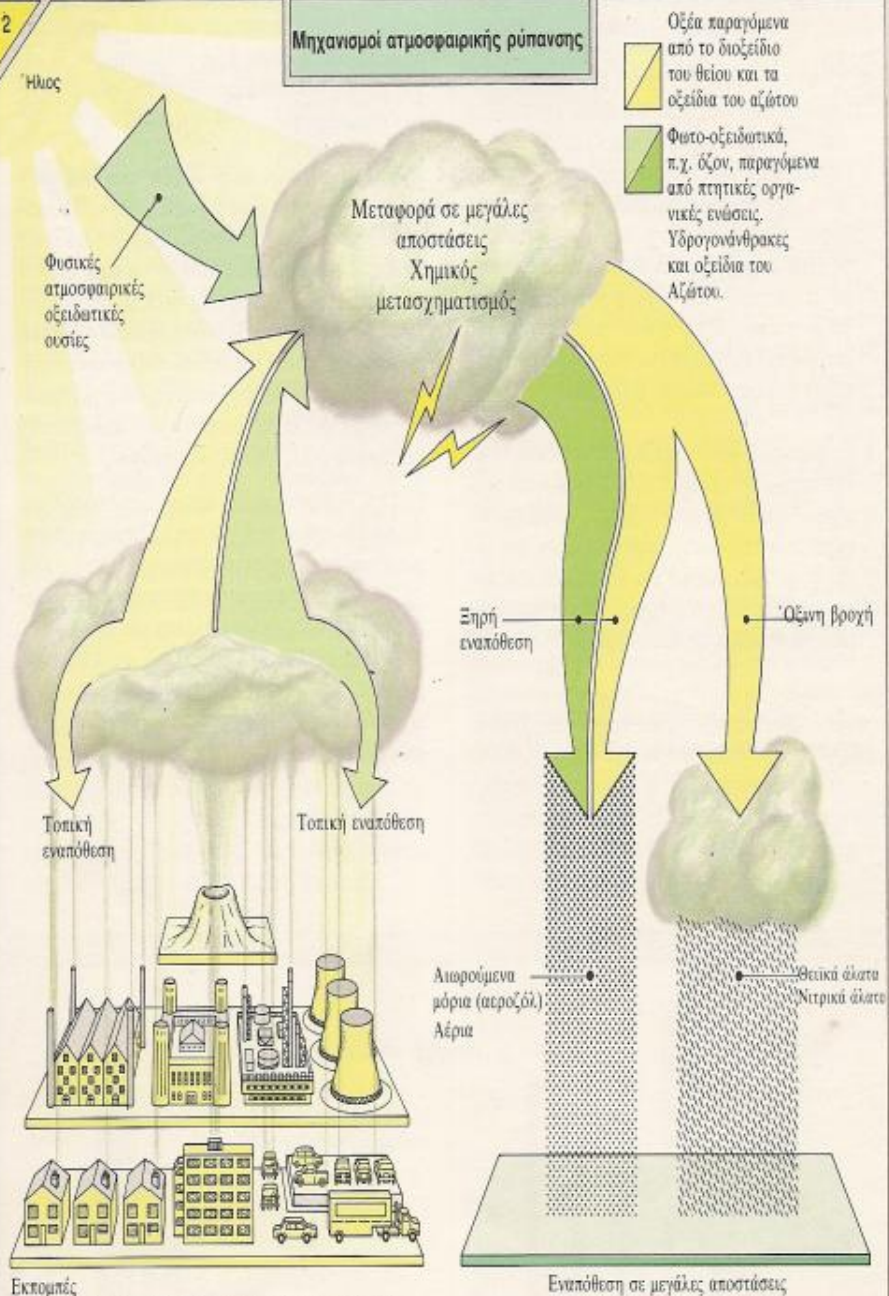
200 ή 500 m με αποτέλεσμα, με τη βοήθεια ευνοϊκών ανέμων, να μεταφέρονται οι ρύποι (SO_x και NO_x) σε μεγάλες αποστάσεις, χιλιάδες χιλιομέτρων μέσα σε λίγες μέρες. Έτσι το θέμα της ρύπανσης καθίσταται από τοπικό, εθνικό, διακρατικό ή και διεθνές.

Το βορειανατολικό τμήμα των ΗΠΑ έχει συνήθως όξινη βροχή με pH μικρότερο απ' ό,τι σε άλλα μέρη της χώρας. Επίσης ο Καναδάς παραπονείται ότι το χαμηλό pH των λιμνών, που είχε ως συνέπεια την ελάττωση της ανάπτυξης των ψαριών, οφείλεται σε ένα ποσοστό, στη μεταφορά ρύπων από τη Β. Αμερική.

Παρομοίως οι Σκανδιναβικές χώρες με τις πολλές λίμνες παραπονούνται για τη μεταφορά SO_2 από την Αγγλία. Οι ρύποι συσσωρεύονται το χειμώνα στα χιόνια και όταν λειώνουν μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες όξινων ουσιών στις λίμνες.

Τα διασυνοριακά αυτά προβλήματα της ρύπανσης διερευνώνται με την εκτέλεση πολύπλοκων ερευνητικών προγραμμάτων, στα οποία συμμετέχουν πολλοί επιστήμονες διαφόρων ειδικοτήτων, με σκοπό να εντοπίσουν τη διακίνηση, τη διασπορά καθώς και τους μετασχηματισμούς των υπό εξέταση ρύ-

Μηχανισμοί ατμοσφαιρικής ρύπανσης



Acid rain

SOURCES



VOC NO_x

Natural

Gaseous pollutants in atmosphere

Particulate pollutants in atmosphere

Pollutants in cloud water and precipitates

RECEPTORS

Dry Deposition

Dry Deposition

Wet Deposition

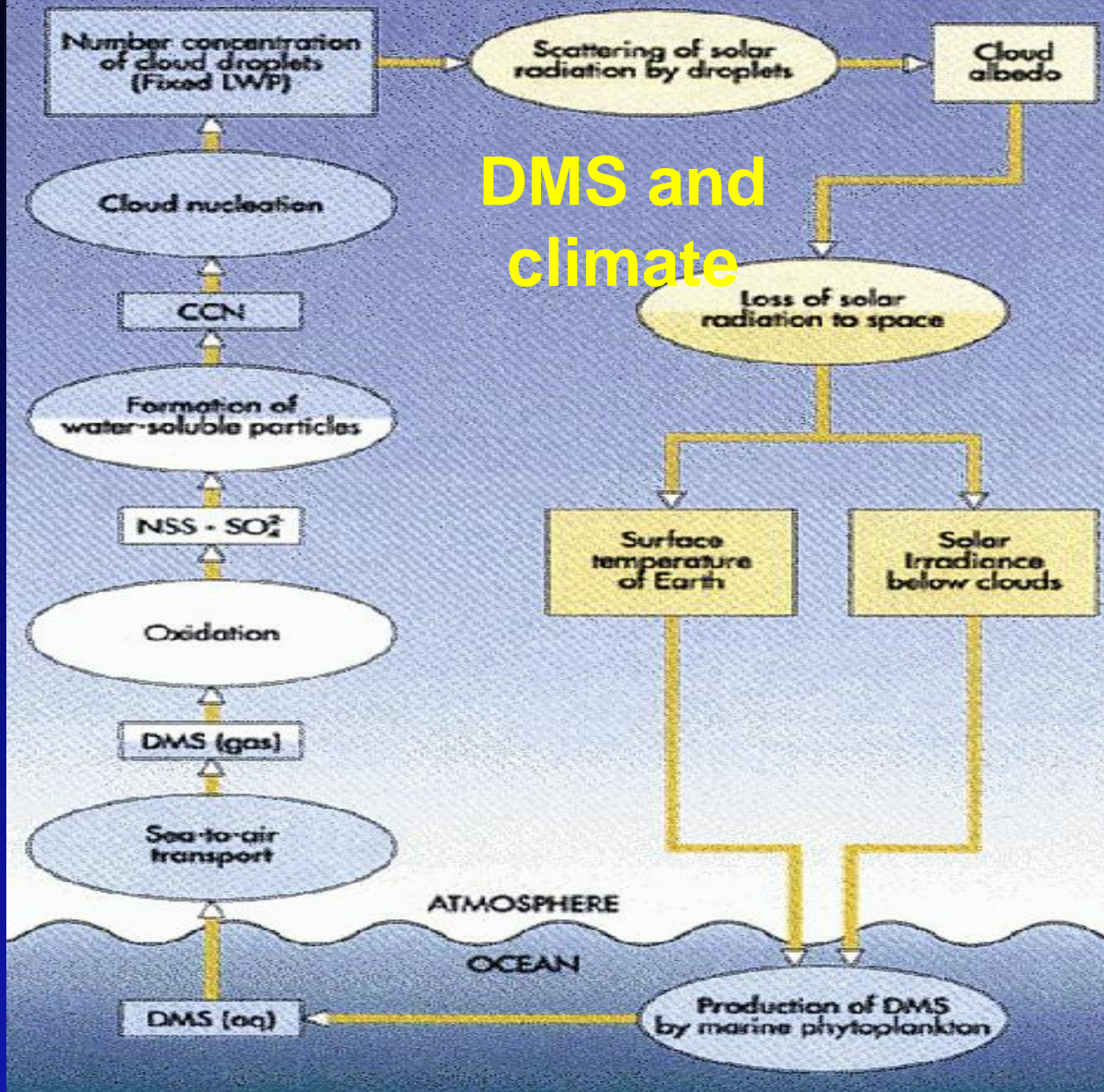


Dimethylsulfid $(\text{CH}_3)_2\text{S}$ or DMS

Το διμεθυλοσουλφίδιο $[(\text{CH}_3)_2\text{S}$ ή DMS] είναι το κύριο βιογενούς προέλευσης αέριο που ελευθερώνεται από τους ωκεανούς και υπολογίζεται ότι φθάνει τα 16×10^{12} g S/yr ενώ ο μέσος χρόνος παραμονής του στην ατμόσφαιρα είναι μία μέρα λόγω της οξειδωσής του σε SO_4^{2-} γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα την επιστροφή του μεγαλύτερου μέρους των εκπομπών DMS στους ωκεανούς.

Το COS αποτελεί ένα ακόμα πολύ σημαντικό αέριο του θείου στην ατμόσφαιρα ($2,8 \times 10^{12}$ g S), με κύρια πηγή τους ωκεανούς όπου παράγεται με φωτοχημικές αντιδράσεις του αποσυντιθέμενου οργανικού υλικού. Άλλες πηγές COS είναι η καιόμενη βιομάζα καθώς και η οξειδωση του CS_2 (παράγεται σε μεγάλα ποσά από τις βιομηχανίες) από ρίζες OH^- στην ατμόσφαιρα.

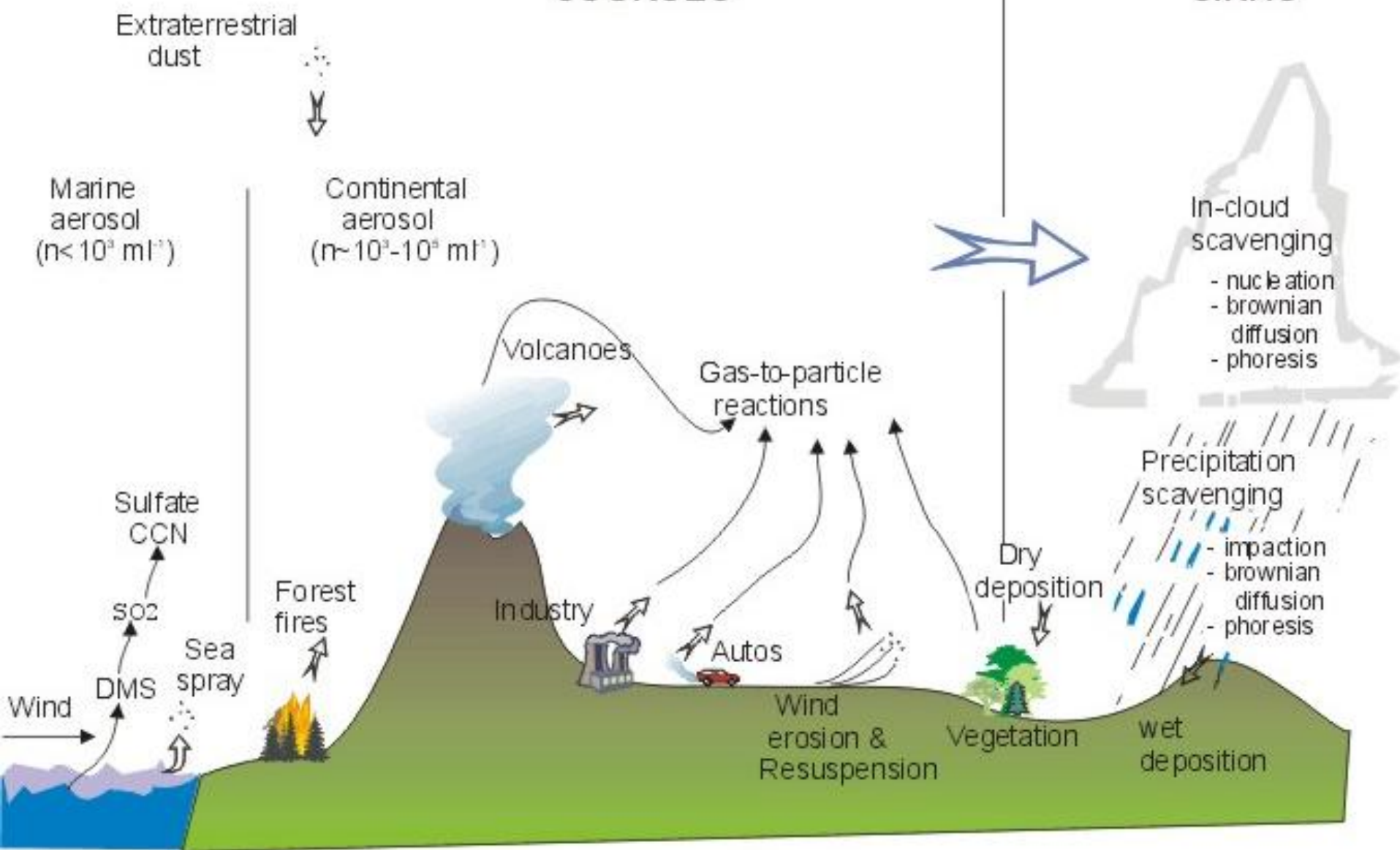
DMS and climate



ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

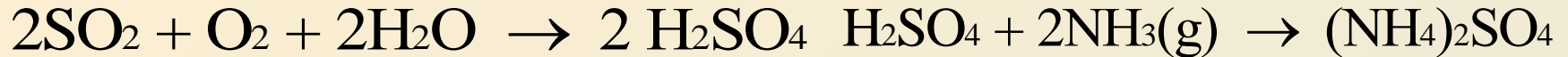
SOURCES

SINKS

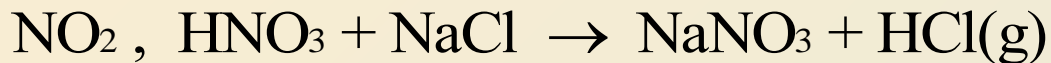


Χημική σύσταση ατμοσφαιρικού αερολύματος

•θειϊκά ιόντα: οξειδωση αερίου SO_2 και αποτελούν το κύριο συστατικό του δευτερογενούς αερολύματος.



•νιτρικά ιόντα: οξειδωση οξειδίων του αζώτου, NO και NO_2 και σχηματίζονται ταχύτερα από τα θειϊκά ιόντα. Το νιτρικό αμμώνιο συνήθως βρίσκεται σε ισορροπία στην ατμόσφαιρα με τις πρόδρομες αέριες ενώσεις του την αμμωνία και τους ατμούς του νιτρικού οξέος.



•αμμωνιακά ιόντα: παράγονται κατά την εξουδετέρωση της αέριας αμμωνίας NH_3 από το θειϊκό και νιτρικό οξύ με αποτέλεσμα το σχηματισμό $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NH_4HSO_4 και NH_4NO_3 . Τα ιόντα NO_3^- , SO_4^{2-} και NH_4^+ αποτελούν δευτερογενή σωματίδια της ατμόσφαιρας και επομένως κατανέμονται στην περιοχή των λεπτόκοκκων σωματιδίων.

- **χλωριούχα ιόντα:** προέρχονται κυρίως από το θαλάσσιο αερόλυμα και από την εξουδετέρωση της αμμωνίας από το υδροχλωρικό οξύ που εκπέμπεται συνήθως κατά την καύση απορριμάτων και από τους σταθμούς παραγωγής ενέργειας.



- **Στοιχειακός - Οργανικός άνθρακας:** Κατά την καύση βιομάζας και καυσίμων εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα μεγάλες ποσότητες πρωτογενών σωματιδίων άνθρακα και πληθώρα οργανικών ενώσεων.

Οργανική σωματιδιακή ύλη (particulate organic matter, POM) αλκάνια με μεγάλη ανθρακική αλυσίδα πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs), PCBs, PCDD/DFs, αλκοόλες, οξέα, κετόνες, εστέρες

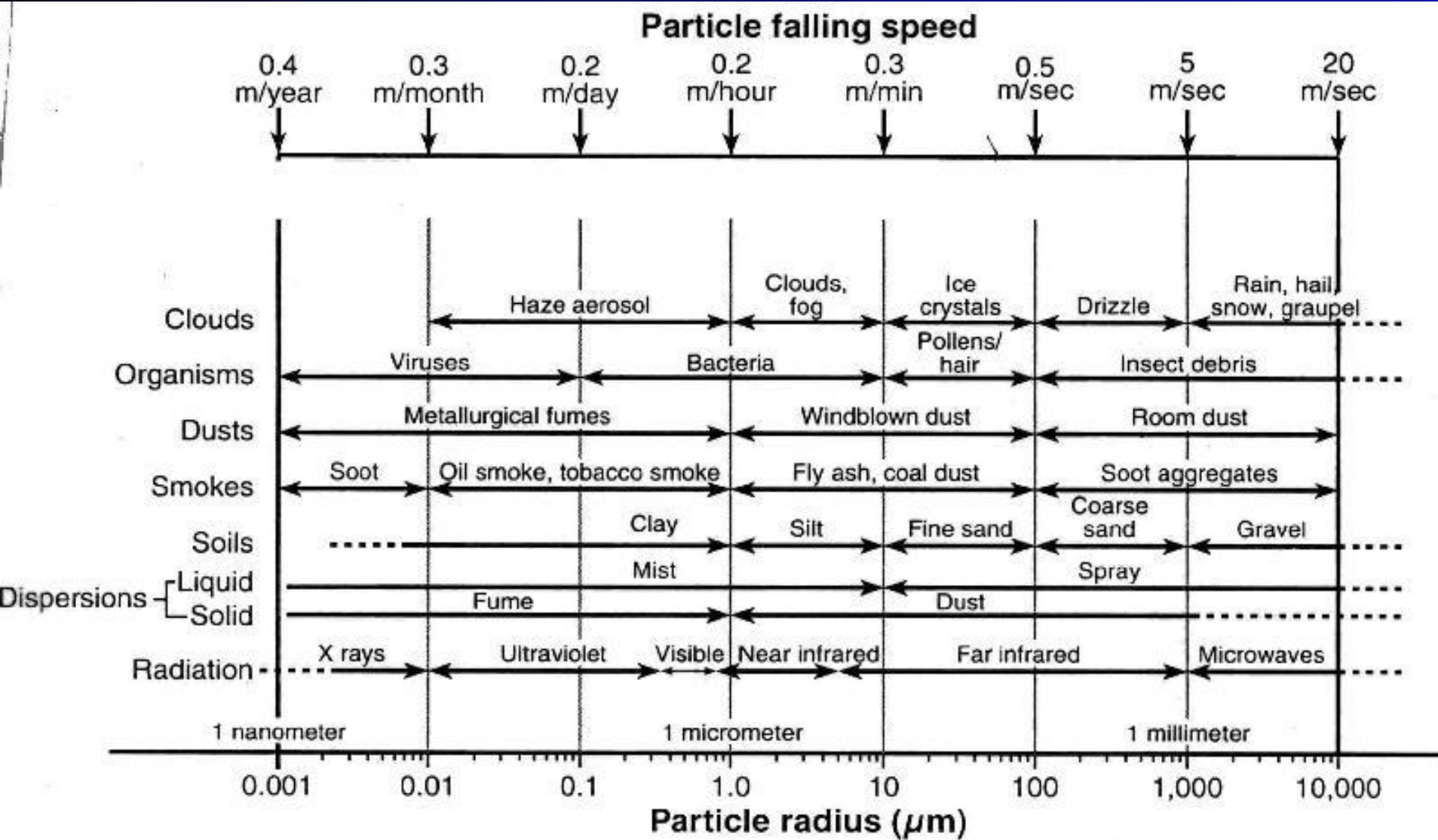
•Συστατικά του στερεού φλοιού της Γης: Si, Al, Ca, Fe Υπάρχει σχετική αβεβαιότητα ως προς τη χημική τους μορφή στο αερόλυμα με τα μεταλλικά οξείδια όπως Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , Al_2O_3 , $CaCO_3$, να κυριαρχούν

•Σωματίδια βιολογικής προέλευσης:σπόροι, γύρη, μύκητες, σωματίδια φυτικής και ζωικής αποσάθρωσης κ.α

κατανέμονται στην περιοχή μεγέθους των χονδρόκοκκων σωματιδίων και συχνά εντάσσονται στο οργανικό κλάσμα των αερολυμάτων.

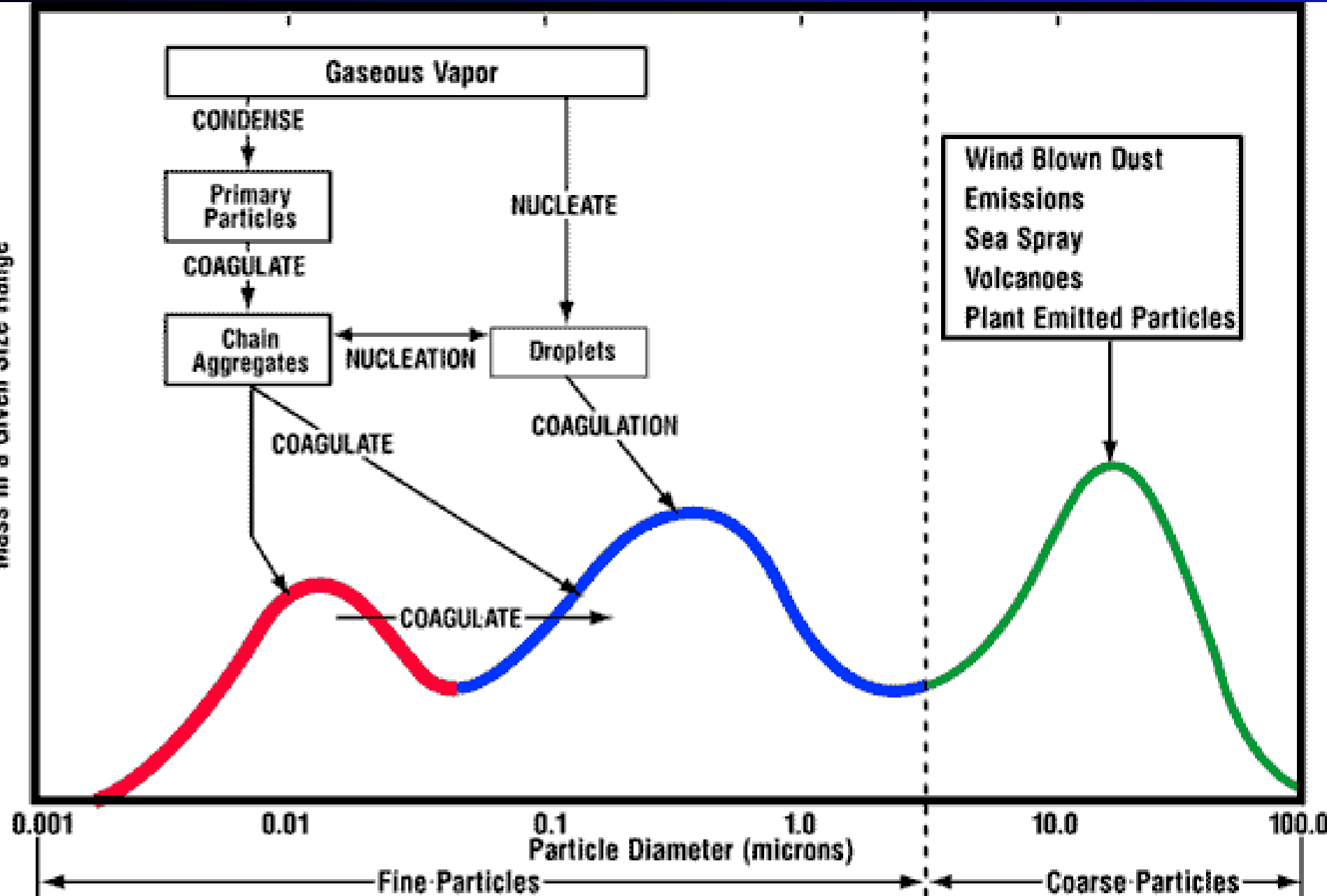
•Ιχνοστοιχεία: η σύσταση του αερολύματος σε ιχνοστοιχεία εξαρτάται από τις πηγές εκπομπής. Οι συγκεντρώσεις τους κυμαίνονται συνήθως σε επίπεδα $ng\ m^{-3}$ και καταλαμβάνουν ένα μικρό ποσοστό της συνολικής σωματιδιακής μάζας.

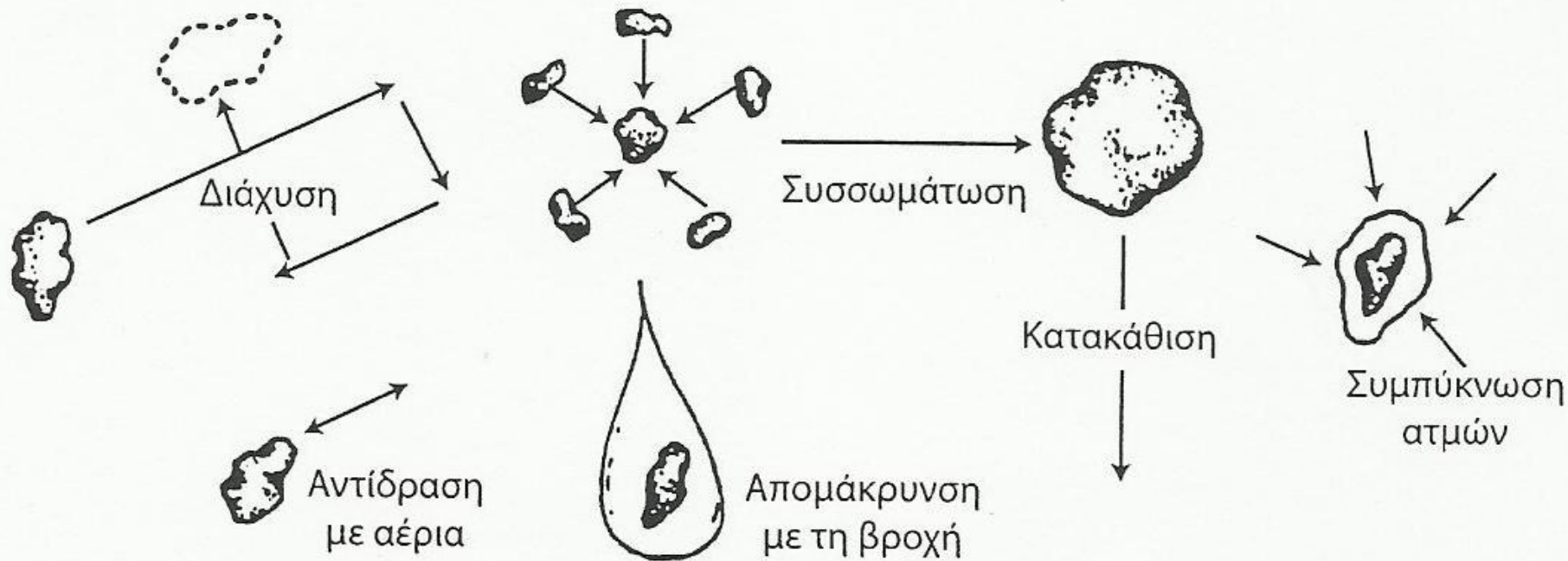
- **Al, Fe, Ca, Si:** Soil erosion, rock dust, coal combustion
- **C:** Incomplete combustion of carbonaceous fuels
- **Na, Cl:** Marine aerosols, chloride from incineration of organohalide polymer wastes
- **Sb, Se:** Very volatile elements, possibly from the combustion of oil, coal, or refuse
- **V:** Combustion of residual petroleum (present at very high levels in residues from Venezuelan crude oil)
- **Zn:** Tends to occur in small particles, probably from combustion
- **Pb:** Combustion of leaded fuels and wastes containing lead



How atmospheric aerosols are formed

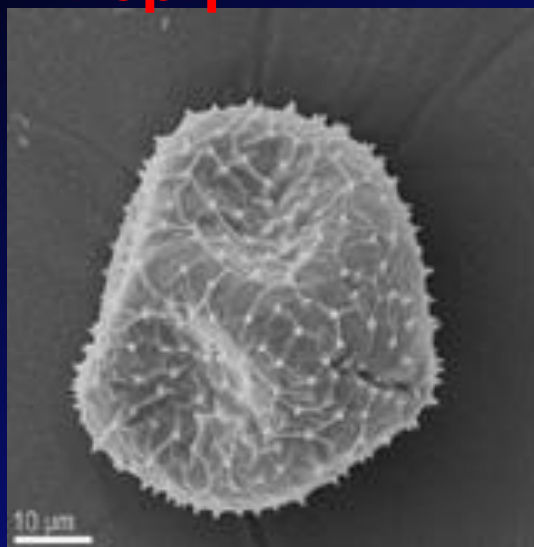
Mass in a Given Size Range



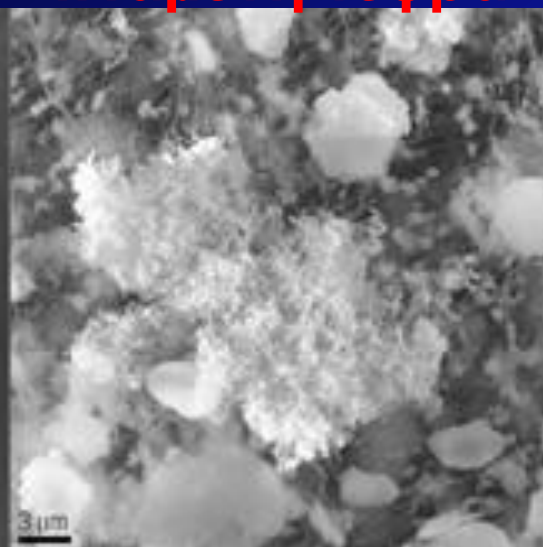


Διεργασίες στις οποίες υπόκεινται τα ατμοσφαιρικά σωματίδια.

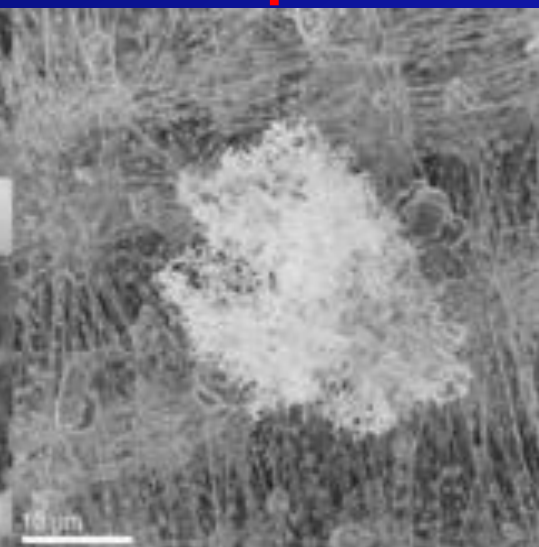
Γύρη



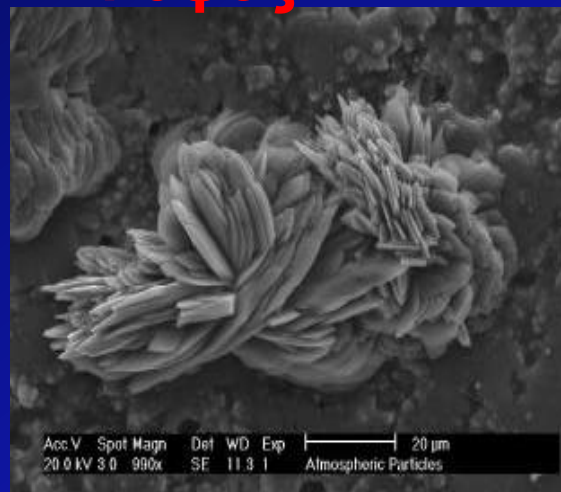
Ιπτάμενη τέφρα



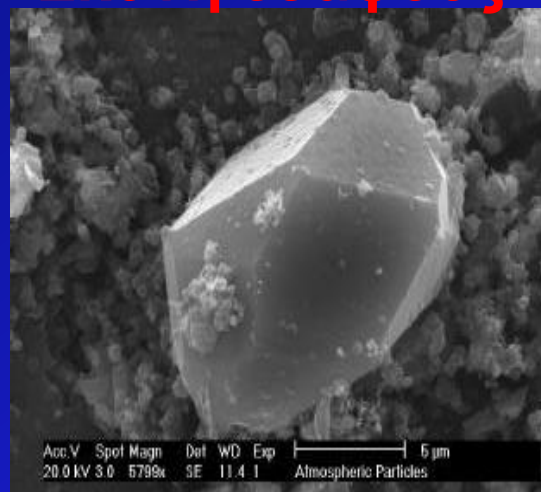
Αιθάλη



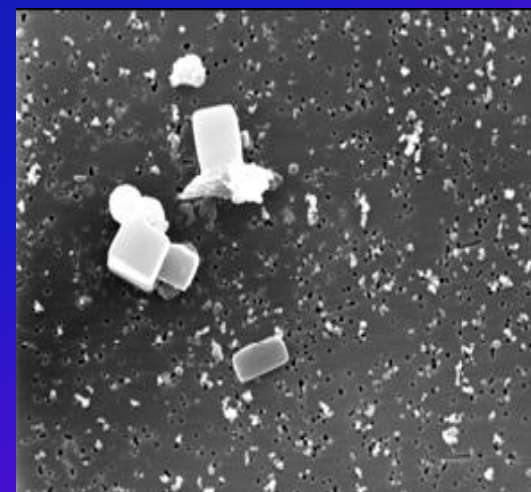
Γύψος



Σκόνη εδάφους

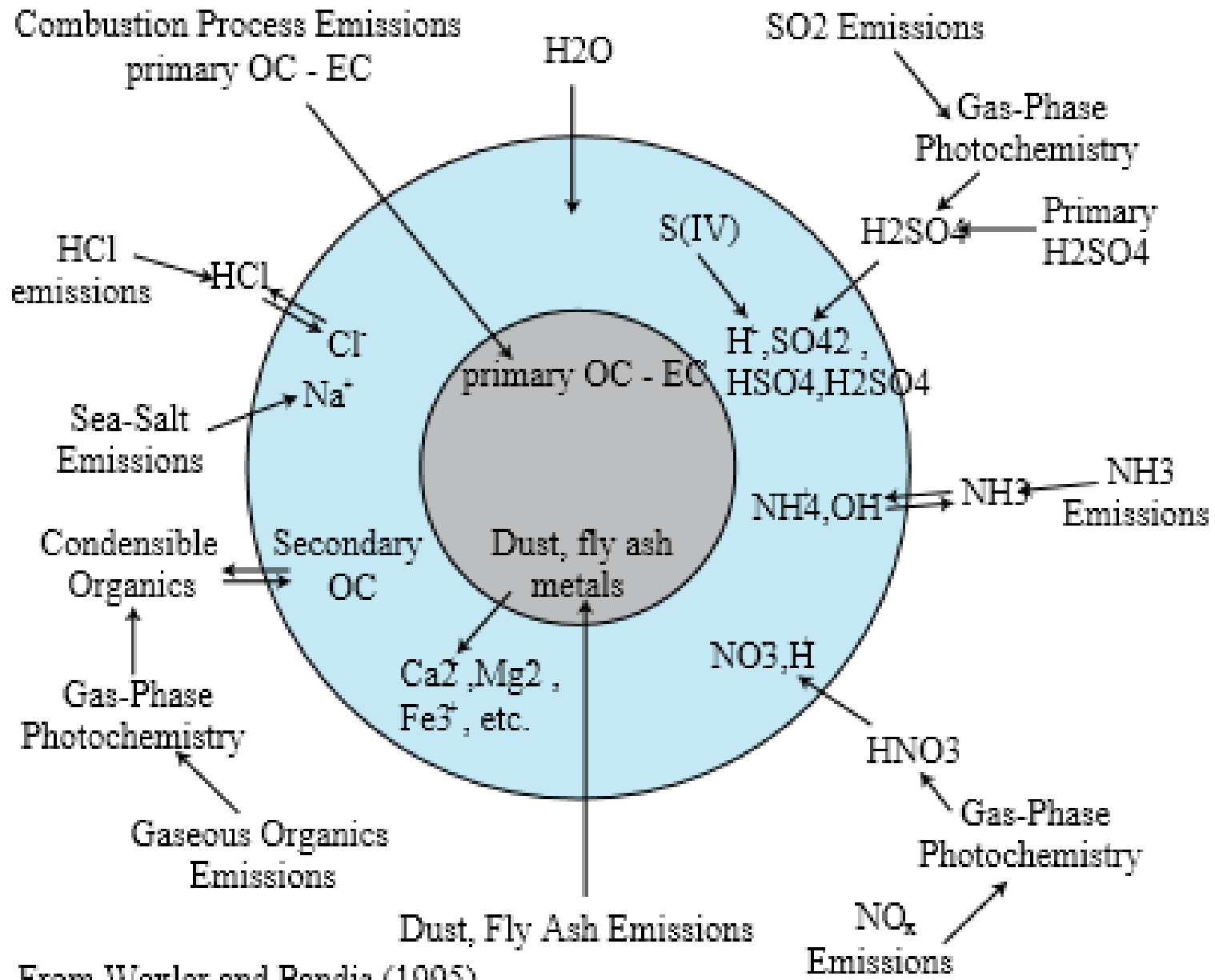


Θαλάσσιο αερόλυμα



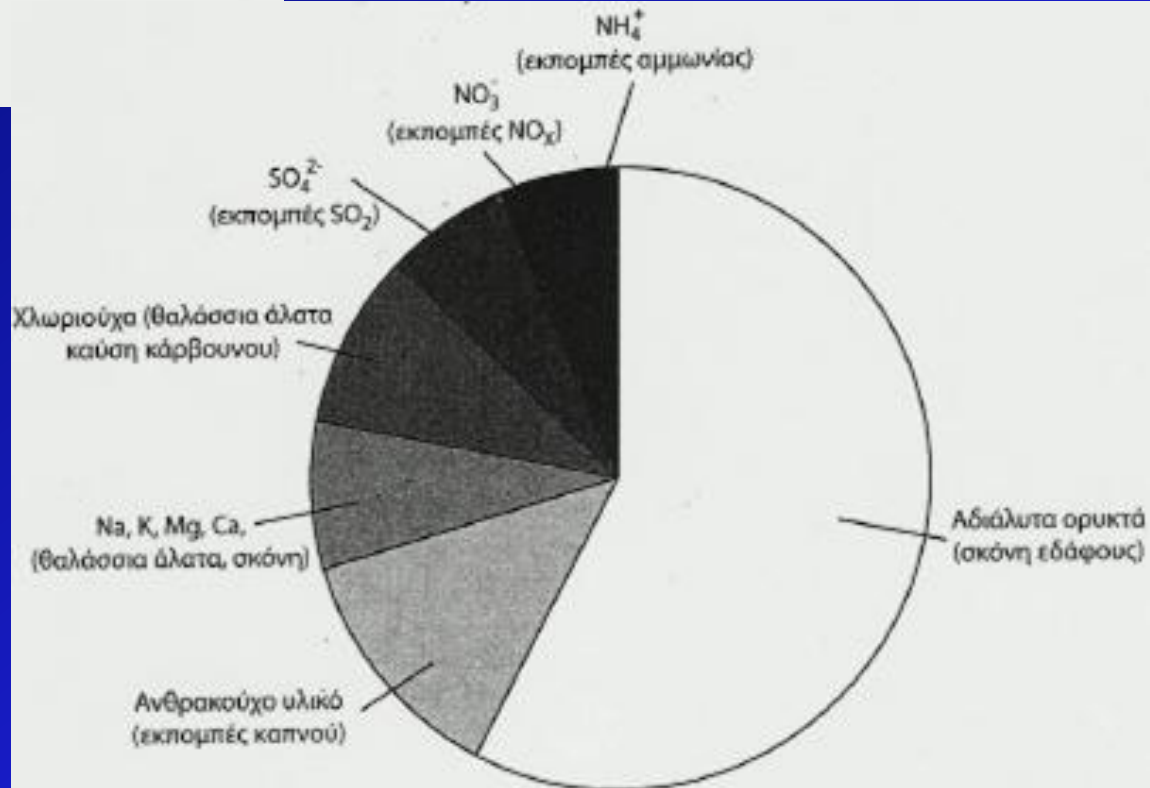
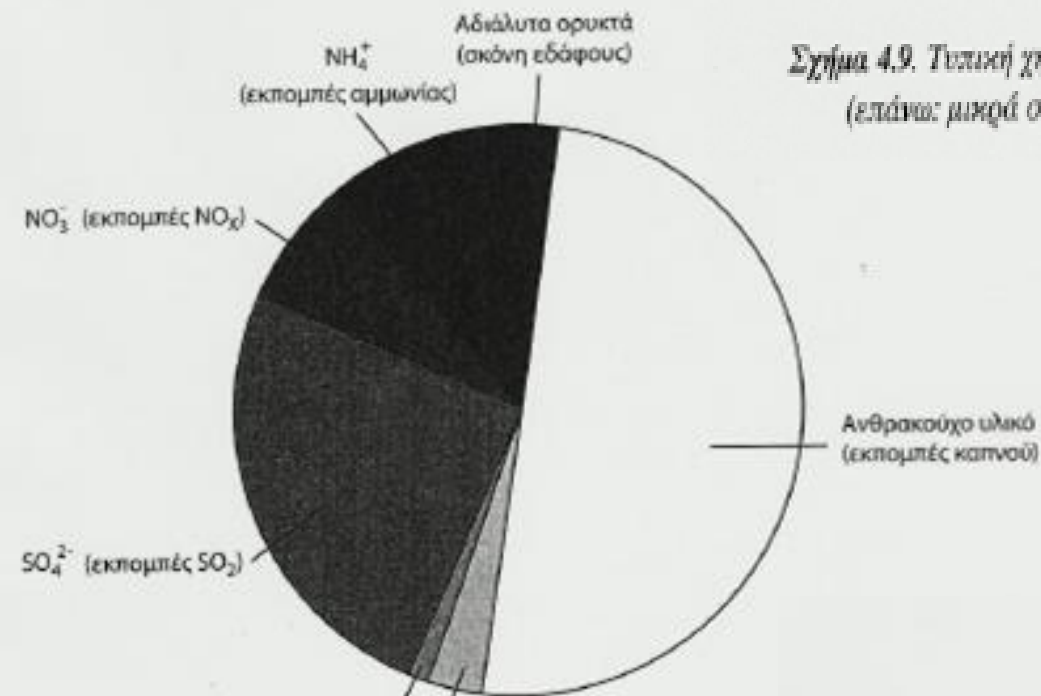
Παγκόσμια παραγωγή ατμοσφαιρικών σωματιδίων μικρότερων από 100 μm
(Tg /έτος)

Πρωτογενή σωματίδια	Παραγόμενη ποσότητα	Δευτερογενή σωματίδια	Παραγόμενη ποσότητα
Φυσικές πηγές			
Σκόνη εδάφους	1000 – 3000	Θειικά από βιογενή αέρια	60 – 110
Θαλάσσια σταγονίδια	1000 – 10000	Θειικά από ηφαιστειακό SO ₂	10 – 30
Ηφαιστειακές εκπομπές	4 – 10000	Οργανικά από βιογενή VOC	40 – 200
Πρωτογενή οργανικά αεροζόλ	26 – 80	Νιτρικά από NO _x	10 – 40
Σύνολο	2030 – 20380	Σύνολο	120 – 380
Ανθρωπογενείς πηγές			
Βιομηχανικές εκπομπές πλην αιθάλης	40 – 30	Θειικά από SO ₂	120 – 180
Αιθάλη	10 – 30	Νιτρικά από NO _x	20 – 50
Καύση βιομάζας	50 – 190	Οργανικά από ανθρωπογενή VOC	5 – 25
Σύνολο	100 – 350	Σύνολο	145 – 255



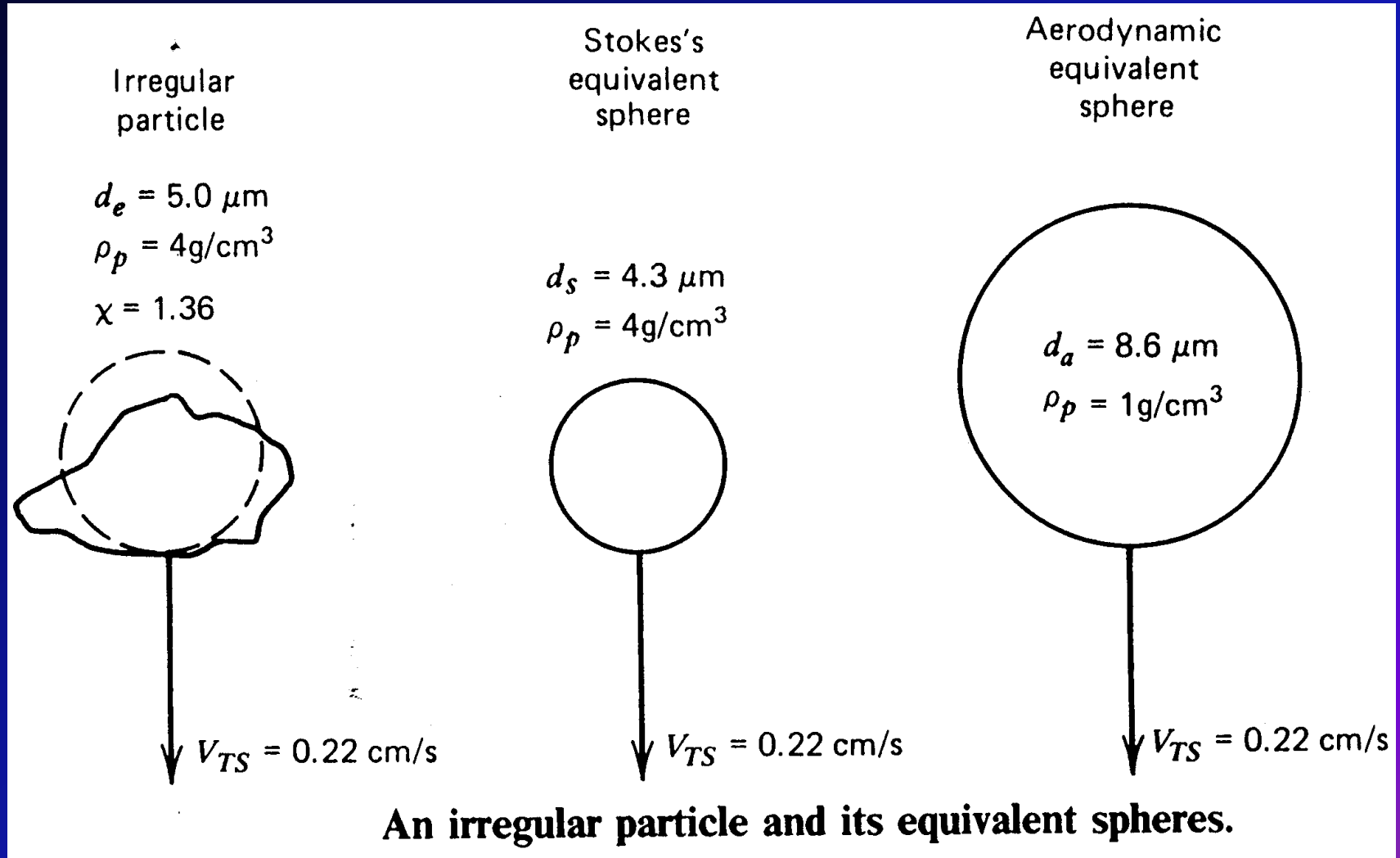
From Wexler and Pandis (1995)

Σχήμα 4.9. Τυπική χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων σε αστικές περιοχές (επάνω: μικρά σωματίδια, $d < 2,5 \mu\text{m}$ - κάτω: μεγάλα σωματίδια, $d > 2,5 \mu\text{m}$).



Διάμετρος Stokes D_s : ορίζεται ως η διάμετρος μιας σφαίρας η οποία έχει την ίδια πυκνότητα και την ίδια ταχύτητα πτώσης στην ατμόσφαιρα με το εξεταζόμενο σωματίδιο

Αεροδυναμική διάμετρος D_a : ορίζεται ως η διάμετρος μιας σφαίρας με πυκνότητα 1g/cm^3 η οποία έχει την ίδια ταχύτητα πτώσης στην ατμόσφαιρα με το εξεταζόμενο σωματίδιο



19.2.3 Ορατότητα. Επίδραση στο κλίμα

Άλλη χαρακτηριστική ιδιότητα των σωματιδίων, που σχετίζεται με το μέγεθός τους είναι η μείωση της ορατότητας. Σωματίδια μικρότερα του 0,1 μm συμπεριφέρονται, όπως τα μόρια και προκαλούν σκεδασμό με αμελητέα επίδραση στην ορατότητα. Σωματίδια με διαμέτρους στην περιοχή 0,1 μέχρι 1 μm προκαλούν τη μεγαλύτερη επίδραση, διότι η διάμετρος τους κείται στην περιοχή των μηκών κύματος της ορατής ακτινοβολίας και λαμβάνουν χώρα φαινόμενα συμβολής. Για σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη του 1 μm , ο σκεδασμός είναι ανάλογος της διαμέτρου.

Πίνακας 19.1 Η ορατότητα της ατμόσφαιρας σε km σε συνάρτηση με την συγκέντρωση των αιωρουμένων σωματιδίων

Περιοχή	Συγκέντρωση σωματιδίων, $\mu\text{g m}^{-3}$	Ορατότητα, Km
Υπαιθρος	30	40
Κοντά σε πόλη	100	12
Μέσα στην πόλη	200	6
Βαριά ρύπανση	700	1,6

Επιπτώσεις στο κλίμα

Τα αιωρούμενα σωματίδια σκεδάζουν και απορροφούν την ακτινοβολία (χημική σύσταση, μέγεθος, δείκτης διάθλασης):

- Ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας σκεδάζεται στο διάστημα προκαλώντας φαινόμενο ψύξης (cooling effect)/ SO_4^{-2}
- Ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται από τα σωματίδια προκαλώντας φαινόμενο θέρμανσης (warming effect)/ στοιχειακός άνθρακας, οργανικό αερόλυμα
- Η υπέρυθη ακτινοβολία που ανακλάται από την επιφάνεια της Γης απορροφάται από τα αιωρούμενα σωματίδια εδαφικής προέλευσης

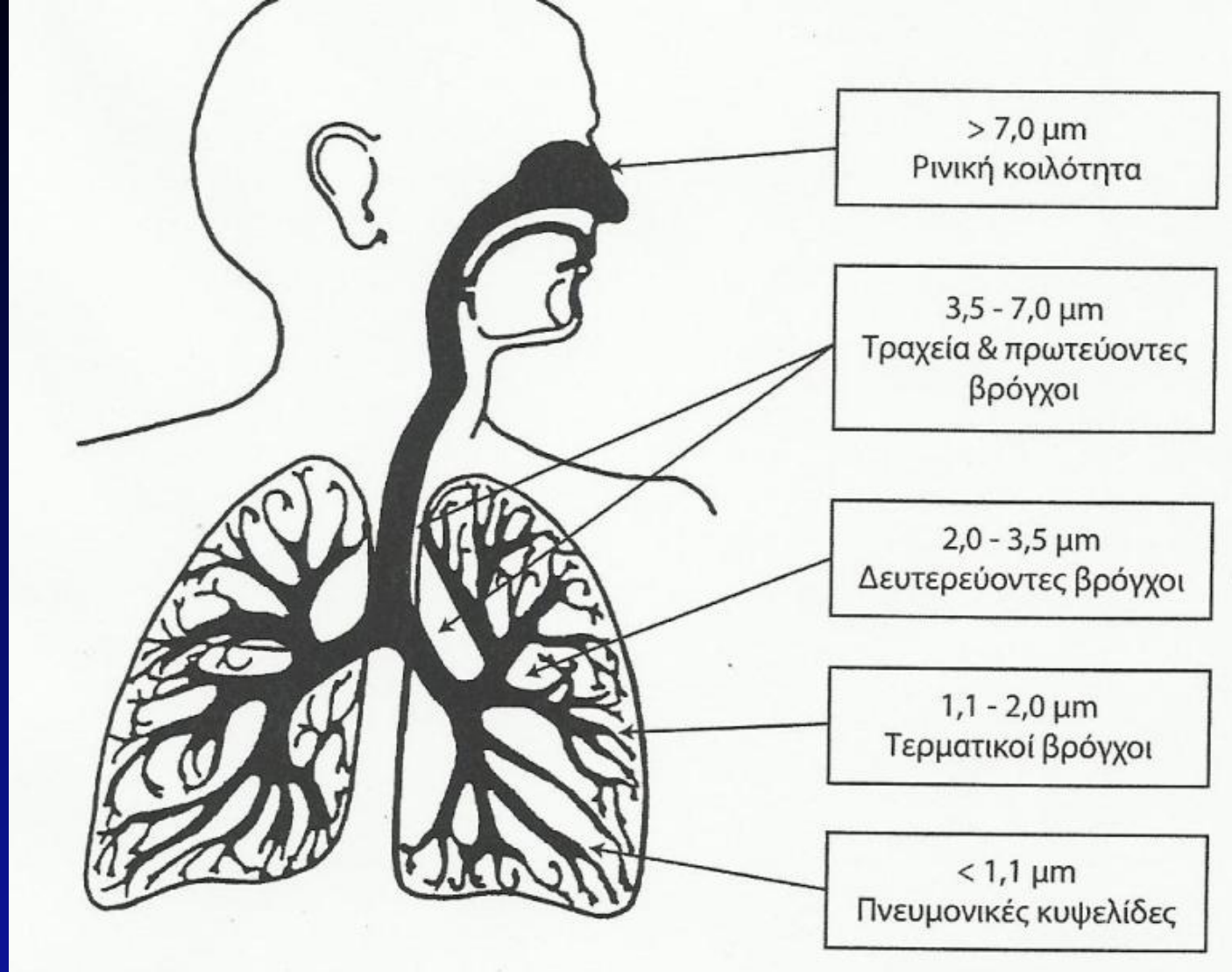
Τοξικότητα

Με το μέγεθος των σωματιδίων συνδέονται επίσης και οι βιολογικές επιδράσεις. Η κυριότερη επίδραση των σωματιδίων στην υγεία των ανθρώπων είναι η βλάβη της αναπνευστικής οδού. Σωματίδια μεγαλύτερα από 10 μm παγιδεύονται στη μύτη ή στο φάρυγγα και προκαλούν μικρά προβλήματα, διότι καταπίνονται, ενώ σωματίδια μικρότερα από 0,1 μm υπάρχει πιθανότητα κατά 50% να εναποθεθούν στους πνεύμονες, οπότε η προκαλούμενη βλάβη είναι μεγαλύτερη από εκείνη που προκαλούν οι αέριοι ρύποι. Η χημική σύσταση των αναπνευσθέντων σωματιδίων επιδρά στους πνεύμονες, ανάλογα με την τοξικότητά τους.

Προτεινόμενες τιμές συγκεντρώσεων

από την παγκόσμια οργάνωση υγείας (WHO) για τον καθορισμό της ποιότητας του αέρα.

Ρύπος	Μέσος χρόνος	Οδηγός τιμή, $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Σωματιδιακή ύλη PM _{2.5}	1 y	10
	24 h (99%)	25
PM ₁₀	1 y	20
	24 h (99%)	50



•Αυξημένες συγκεντρώσεις του αριθμού των σωματιδίων $< 100 \text{ nm}$ οδηγούν σε αύξηση της νοσηρότητας και θνησιμότητας.

•Η χημική σύσταση των σωματιδίων (αιθάλη, οργανικές ενώσεις, μέταλλα) αυξάνει τον κίνδυνο ασθενειών.

Τέλος Ενότητας

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «**Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση**» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



ΣΗΜΕΙΩΜΑΤΑ

Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.

Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, Εμμανουήλ Δασενάκης 2015. Εμμανουήλ Δασενάκης. «Χημεία Περιβάλλοντος. Οxygen – Ozon - O₂ – O₃ – O.». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://opencourses.uoa.gr/courses/CHEM3/>.

Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (1/6)

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

Εικόνες/Σχήματα/Διαγράμματα/Φωτογραφίες

Εικόνα 1: [διαφάνεια 2] Oxygen-Ozon-O₂-O₃-O. Copyrighted. Σύνδεσμος: <http://biophysics.sbg.ac.at/atmo/o3-scans/chapman.jpg>. Πηγή: www.uni-salzburg.at.

Εικόνα 2: [διαφάνεια 3 αριστερά] Ozone production. Copyrighted. Σύνδεσμος: https://espo.nasa.gov/solve/content/SOLVE_Science_Overview. Πηγή: espo.nasa.gov.

Εικόνα 3: [διαφάνεια 3 δεξιά] Catalytic Ozone Destruction. Copyrighted. Σύνδεσμος: https://espo.nasa.gov/solve/content/SOLVE_Science_Overview. Πηγή: espo.nasa.gov.

Εικόνα 4: [διαφάνεια 6] Ο Κύκλος του Chapman. Copyrighted. Σύνδεσμος: <http://oceanworld.tamu.edu/resources/environment-book/stratosphericozone.html>. Πηγή: [/oceanworld.tamu.edu](http://oceanworld.tamu.edu).

Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (2/6)

Εικόνα 5: [διαφάνεια 7 αριστερά] Atmosphere's structure. Copyright 1995-1999, 2000, The Regents of the University of Michigan.. Σύνδεσμος: <http://www.nasa.gov/centers/langley/news/factsheets/DIAL.html>. Πηγή: www.nasa.gov.

Εικόνα 6: [διαφάνεια 7 δεξιά] Ατμοσφαιρικό όζον. Public Domain. Σύνδεσμος: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Atmospheric_ozone.svg. Πηγή: en.wikipedia.org.

Εικόνα 7: [διαφάνεια 8] The Dobson Unit. Copyrighted. Σύνδεσμος: <http://www.atm.ch.cam.ac.uk/tour/dobson.html>. Πηγή: www.cam.ac.uk.

Εικόνα 8: [διαφάνεια 16] TOMS total ozone. Copyrighted. Σύνδεσμος: <http://www.ace.uwaterloo.ca/ozonemonitoring.html>. Πηγή: NASA TOMS Mission.

Εικόνα 9: [διαφάνεια 17] Η τρύπα του όζοντος στην Ανταρκτική. Copyrighted.

Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (3/6)

Εικόνες 10,11: [διαφάνεια 19] Εκτίμηση παγκόσμιας απελευθέρωσης CFC-11 και CFC-12. Copyrighted.

Εικόνα 12: [διαφάνεια 20] Εκτίμηση παγκόσμιας απελευθέρωσης CFC-11 και CFC-12. Copyrighted.

Εικόνα 13: [διαφάνεια 21] Παγκόσμια παραγωγή CFCs. Copyrighted. Πηγή: UNEP.

Εικόνα 14: [διαφάνεια 23 άνω] Τρισδιάστατη δομή του CFCl_3 (CFC-11). Copyrighted.

Εικόνα 15: [διαφάνεια 23 κάτω] Τρισδιάστατη δομή του HFC-134a (CH_2FCF_3).

Copyrighted.

Εικόνα 16: [διαφάνεια 27 άνω δεξιά] Θείο (Sulfur). Public Domain.

Σύνδεσμος: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sulfur.jpg>. Πηγή: commons.wikimedia.org.

Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (4/6)

Εικόνα 17: [διαφάνεια 31] Μηχανισμοί Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης. Copyrighted. Εικόνα 18: [διαφάνεια 32] Acid rain. Public Domain. Σύνδεσμος: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Origins_of_acid_rain.svg. Πηγή: commons.wikimedia.org.

Εικόνα 19: [διαφάνεια 34] DMS and climate. Copyrighted.

Εικόνα 20: [διαφάνεια 35] Atmospheric Aerosol Sources. Copyrighted. Σύνδεσμος: <http://www.ems.psu.edu/~Ino/Meteo437/Aerosol.jpg>. Πηγή: www.ems.psu.edu.

Εικόνα 21: [διαφάνεια 39] Particle falling speed. Copyrighted. Σύνδεσμος: <http://www.ems.psu.edu/~Ino/Meteo437/Ptclcat.jpg>. Πηγή: www.ems.psu.edu.

Εικόνα 22: [διαφάνεια 40] How atmospheric aerosols are formed. Copyrighted. Σύνδεσμος: http://www2.nau.edu/~doetqp/p/courses/env440/env440_2/lectures/lec35/lec35.htm. Πηγή: www2.nau.edu.

Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (5/6)

Εικόνα 23: [διαφάνεια 41] Διεργασίες στις οποίες υπόκεινται τα ατμοσφαιρικά σωματίδια. Copyrighted.

Εικόνες 24,25,26,27: [διαφάνεια 42] Ατμοσφαιρικά σωματίδια. Copyrighted.

Εικόνα 28: [διαφάνεια 44] Copyrighted. Πηγή: Wexler and Pandis (1995).

Εικόνες 29, 30: [διαφάνεια 45] Τυπική χημική σύσταση αιωρούμενων σωματιδίων σε αστικές περιοχές. Copyrighted.

Εικόνα 31: [διαφάνεια 46] An irregular particle and its equivalent spheres. Copyrighted.

Εικόνα 32: [διαφάνεια 50] Copyrighted.

Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (6/6)

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

Πίνακες

Πίνακας 1: [διαφάνεια 22] Some CFC Alternates. Copyrighted. Πηγή: From Kirschner 1994, see Freemantle 1995.