

Αρχές Οικολογίας και Περιβαλλοντικής Χημείας

*Φαινόμενο θερμοκηπίου – Μείωση του στρατοσφαιρικού
όζοντος*

Νίκος Μαμάσης

Τομέας Υδατικών Πόρων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα 2008

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

ΤΡΟΠΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Αγωγή (conduction)

Η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται από μόριο σε μόριο, ενώ η ταχύτητα μεταφοράς, εξαρτάται από την δομή των μορίων του υλικού (καλοί-κακοί αγωγοί θερμότητας)

Μεταγωγή (convection)

Η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται με μετακίνηση μαζών (π.χ αέρα ή νερού)

Ακτινοβολία (radiation)

Όλα τα αντικείμενα με θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν εκπέμπουν ακτινοβολία, η οποία προέρχεται από την ισχυρή ταλάντωση των ηλεκτρονίων των μορίων. Η ακτινοβολία ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός υπό τη μορφή κυμάτων που απελευθερώνουν ενέργεια όταν απορροφώνται από κάποιο σώμα. Ορισμένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας είναι:

- Τα μεγαλύτερα μήκη κύματος μεταφέρουν λιγότερη ενέργεια
- Το εκπεμπόμενο μήκος κύματος εξαρτάται από την θερμοκρασία του αντικειμένου
- Τα αντικείμενα με μεγάλη θερμοκρασία εκπέμπουν περισσότερη ακτινοβολία
- Τα θερμότερα αντικείμενα εκπέμπουν σε ευρύτερη περιοχή του φάσματος σε σχέση με τα ψυχρότερα

ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

ΜΟΝΟΧΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Νόμος του Planck

Η ένταση μονοχρωματικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μελανό σώμα σε μήκος κύματος λ , εξαρτάται αποκλειστικά από τη θερμοκρασία του σώματος και δίδεται από τη σχέση:

$$E_{\lambda} = c_1 / [\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)]$$

όπου:

$$c_1 = 3.74 \cdot 10^{-16} \text{ W m}^2$$

$$c_2 = 1.44 \cdot 10^{-2} \text{ m K}$$

λ το μήκος κύματος σε m

T η θερμοκρασία του σώματος σε Kelvin

Νόμος της μετατόπισης του Wien (displacement law)

Η μέγιστη ένταση ακτινοβολίας μελανού σώματος εκπέμπεται σε συγκεκριμένο μήκος κύματος, το οποίο δίδεται από τη σχέση:

$$\lambda_m = 2897 / T$$

όπου:

λ_m το μήκος κύματος σε μm

T η θερμοκρασία του σώματος σε Kelvin

ΕΝΤΑΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Νόμος των Stefan-Boltzman

Η ένταση ακτινοβολίας μελανού σώματος δίδεται από τη σχέση:

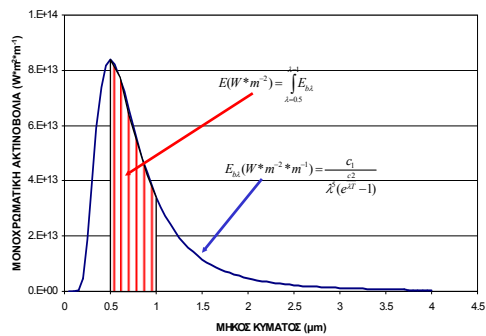
$$E_b = \sigma T^4$$

όπου:

$$\sigma \text{ σταθερά } 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

T η θερμοκρασία του σώματος σε βαθμούς Kelvin

Η παραπάνω σχέση προκύπτει από την ολοκλήρωση της σχέσης του Planck σε όλο το πεδίο ορισμού του μήκους κύματος. Η ένταση ακτινοβολίας έχει μονάδες ισχύος ανά επιφάνεια, και συνήθως υπολογίζεται σε W m^{-2}



ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

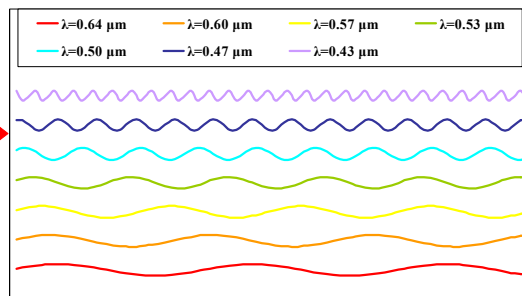
Ενέργεια ακτινοβολίας

Η ενέργεια που μεταφέρεται με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σχεδόν ποτέ δεν είναι ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος (μονοχρωματική), αλλά αποτελείται από ένα σύνολο μονοχρωματικών ακτινοβολιών. Η κατανομή της ενέργειας ακτινοβολίας σε συνάρτηση με το μήκος κύματος ονομάζεται **φάσμα**. Η ακτινοβολία στις διάφορες περιοχές του φάσματος (κάθε περιοχή αντιστοιχεί σε ένα διάστημα τιμών του μήκους κύματος), έχει συγκεκριμένες ιδιότητες. Για παράδειγμα η ορατή ακτινοβολία αντιστοιχεί στην περιοχή με μήκη κύματος από 0.39 έως 0.72 μm (ιώδες και ερυθρό αντίστοιχα)

Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Τυπικό μήκος κύματος (μm)

10^{-7}	Ακτίνες Γάμα
10^{-4}	Ακτίνες X
10^{-1}	Υπεριώδης
0.5	Ορατό φως
2	Υπέρυθρο
10^3	Μικροκύματα
10^6	Τηλεόραση
10^8	Ραδιοκύματα



ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ - ΕΚΠΟΜΠΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΑΠΟ ΜΟΡΙΑ

Κάθε μόριο κατέχει μία ποσότητα ενέργειας, εκτός από αυτή που οφείλεται στην κίνησή του στο χώρο. Αυτή η ενέργεια περιλαμβάνει τρεις κύριες μορφές:

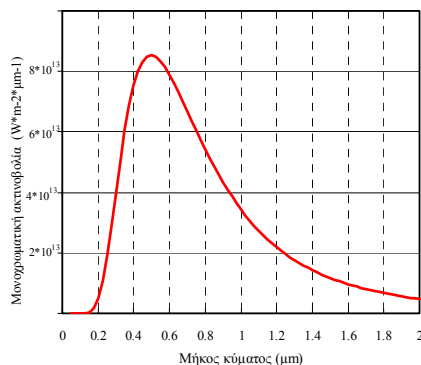
- Κινητική και ηλεκτροστατική δυναμική ενέργεια από ηλεκτρόνια που περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα κάθε ατόμου
- Ενέργεια που συνδέεται με την δόνηση των ατόμων γύρω από τη μέση θέση τους
- Ενέργεια που συνδέεται με την περιφορά των μορίων γύρω από το κέντρο βάρους τους

Η κβαντομηχανική προβλέπει ότι για κάθε μόριο επιτρέπονται συγκεκριμένες τροχιές ηλεκτρονίων, εύρος δονήσεων και ρυθμός περιστροφής. Κάθε πιθανός συνδυασμός των τριών μπορεί να προσδιοριστεί με ένα **επίπεδο ενέργειας** το οποίο είναι το άθροισμα των τριών ενεργειών. Κάθε μόριο ανεβαίνει ή κατεβαίνει σε κάποιο επίπεδο ενέργειας απορροφώντας ή εκπέμποντας ακτινοβολία. Η θεωρία προβλέπει συγκεκριμένες μετακινήσεις στα επίπεδα οι οποίες παραμένουν ίδιες στην εκπομπή και στη λήψη. Δεδομένου ότι ένα μόριο απορροφά και ακτινοβολεί ενέργεια σε διαχωρισμένες ποσότητες (που αντιστοιχούν στις επιτρεπόμενες αλλαγές στο επίπεδο ενέργειας του), συνεπάγεται ότι μπορεί να αντιδράσει με ακτινοβολία που έχει συγκεκριμένα μήκη κύματος

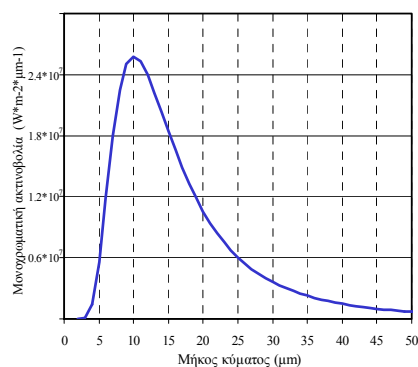
ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΗΛΙΟΥ ΚΑΙ ΓΗΣ

ΦΑΣΜΑ ΜΕΛΑΝΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ (5800 K)
ΕΝΤΑΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ: $6.3 \cdot 10^7 \text{ W m}^{-2}$

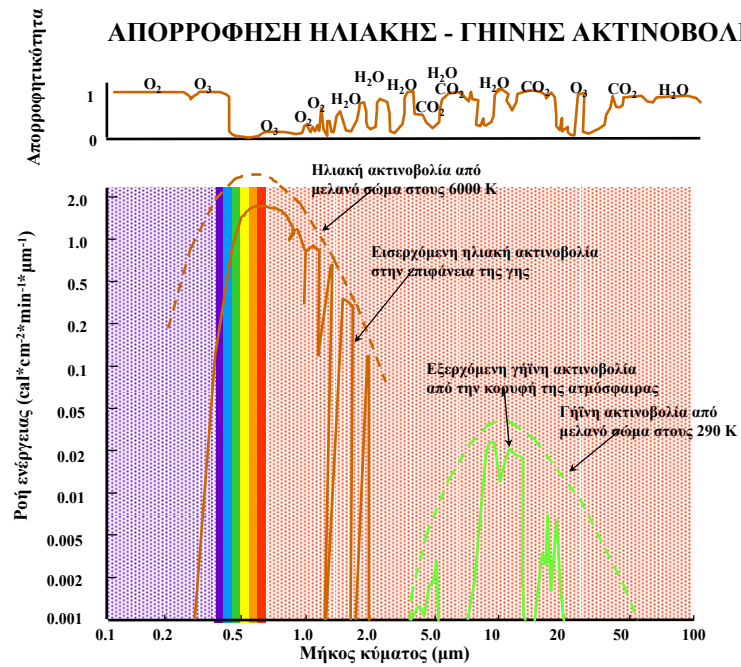


ΦΑΣΜΑ ΜΕΛΑΝΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ (288 K)
ΕΝΤΑΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ: 390 W m^{-2}



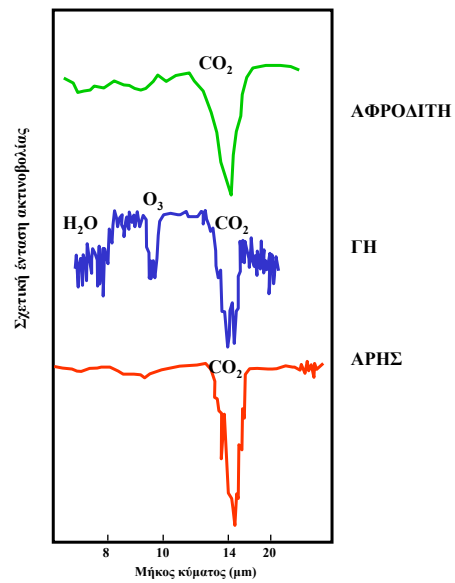
ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ - ΓΗΙΝΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

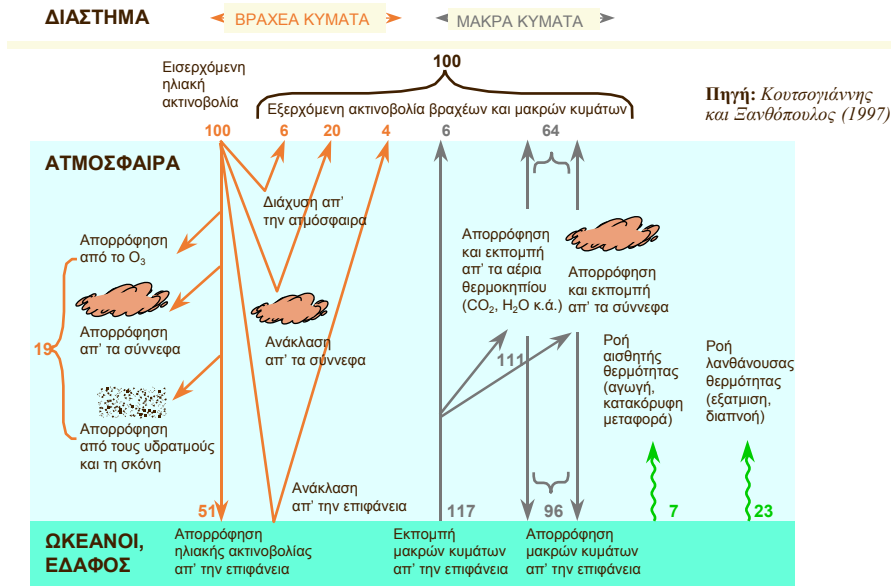


ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΠΛΑΝΗΤΩΝ



ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΤΗΣ ΓΗΣ

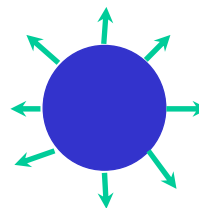
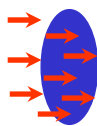
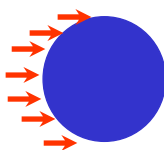


ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΓΗΣ ΧΩΡΙΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

ΕΙΣΕΡΧΟΜΕΝΗ ΗΛΙΑΚΗ ΙΣΧΥΣ
 $(1-\rho) \cdot E_N \cdot \pi \cdot R_T^2$

ΙΣΧΥΣ ΓΗΙΝΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ
 $E_E \cdot 4 \cdot \pi \cdot R_T^2$



E_N Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας στη γη = 1390 W/m²

ρ Ανακλαστικότητα γης = 0.30

R_T Ακτίνα γης

$$(1-\rho) \cdot E_N \cdot \pi \cdot R_T^2 = E_E \cdot 4 \cdot \pi \cdot R_T^2 \quad \uparrow \quad E_E = (1/4) \cdot (1-\rho) \cdot E_N = 243 \text{ w/m}^2$$

$$E_E = \sigma T^4$$

σ η σταθερά Stefan-Boltzman που ισούται με $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

T η θερμοκρασία του σώματος σε βαθμούς Kelvin

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΓΗΣ 256 °K

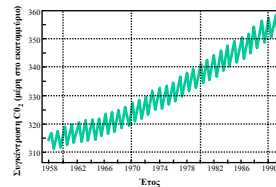
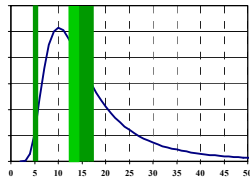
ΑΕΡΙΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ (1)

ΟΝΟΜΑ-ΟΓΚΟΣ (%)

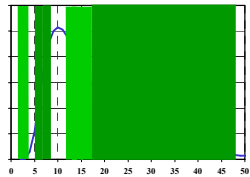
ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΓΗΪΝΗΣ
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

ΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ

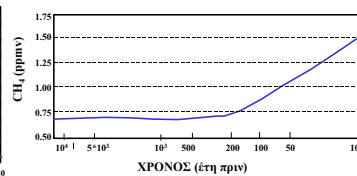
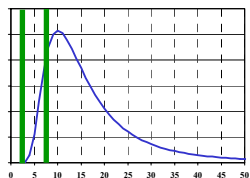
ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ
ΑΝΘΡΑΚΑ (CO_2)
0.035%



ΥΔΡΑΤΜΟΙ (H_2O)
0-4%



ΜΕΘΑΝΙΟ (CH_4)
0.00017%



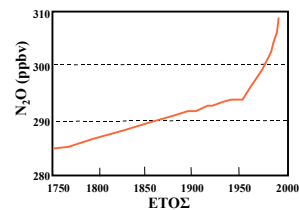
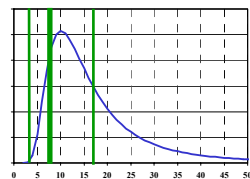
ΑΕΡΙΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ (2)

ΟΝΟΜΑ-ΟΓΚΟΣ (%)

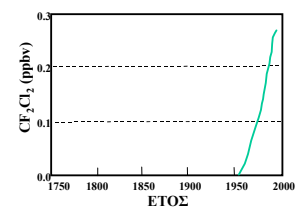
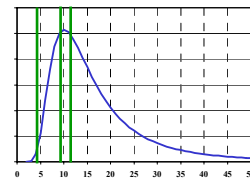
ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΓΗΪΝΗΣ
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

ΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ

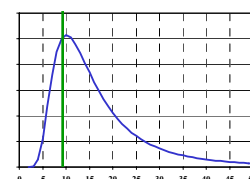
ΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ
ΑΖΩΤΟΥ (N_2O)
0.00003%



ΧΛΩΡΟΦΘΟΡΑΝ-
ΘΡΑΚΕΣ (CFCs)
0.00000001%



ΟΖΟΝ (O_3)
0.000004%



ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

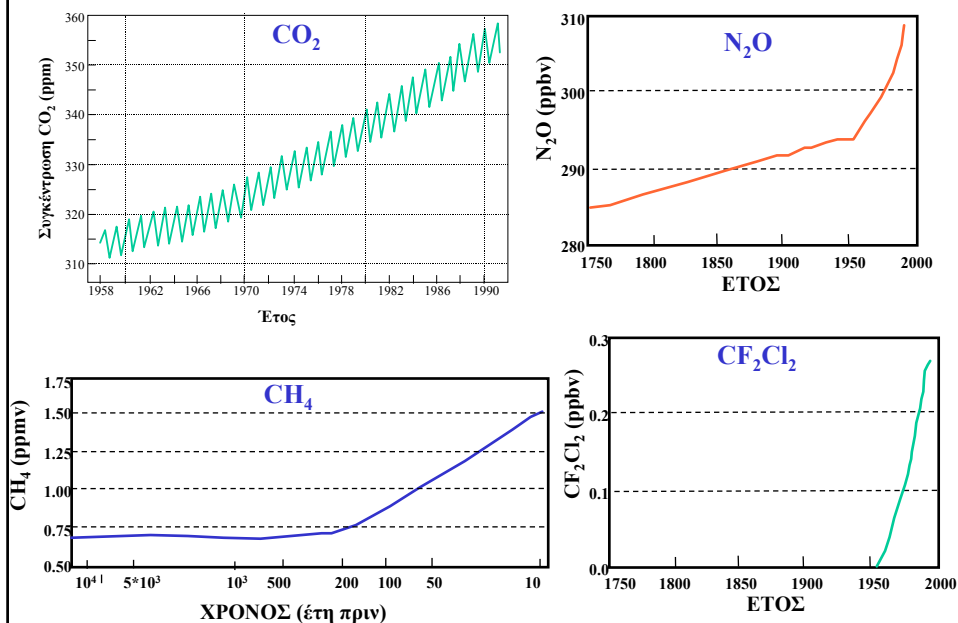
ΠΡΟΣΦΑΤΕΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ

Αέριο	Συγκέντρωση (1750)*	Συγκέντρωση (2004)	Επίδραση στην αύξηση της ακτινοβολίας (W/m ²)	Αιτίες μεταβολής
CO ₂	280 ppm	377.3 ppm	1.66	Καύσεις
CH ₄	688 ppb	1730 ppb	0.5	Ορυζώνες, αγελάδες, σκουπιδοτόποι
N ₂ O	270 ppb	319 ppb	0.16	Λιπάσματα, καύσεις, μικρόβια
Τροποσφαιρικό O ₃	25 ppb	34 ppb	0.35	Φωτοχημικές αντιδράσεις
CFC-11	0	253 ppt	0.34	Φρέον (από 1930)
CFC-12	0	545 ppt		Φρέον (από 1930)
CCl ₄	0	93 ppt		
CH ₃ CCl ₃	0	23 ppt		
HCFC-22	0	174 ppt		
HFC-23	0	14 ppt		
C ₂ F ₆	0	3 ppt		
SF ₆	0	5.22 ppt	0.002	
SF ₅ CF ₃	0	0.12 ppt	< 0.0001	

* Τα μεγέθη του 1750 προσδιορίζονται κύρια από μετρήσεις φυσαλίδων αέρα οι οποίες παγιδεύτηκαν σε πυρήνες πάγου, όπως συσσωρεύονταν το χιόνι στις πολικές περιοχές

ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

ΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ N₂O, CF₂Cl₂, CH₄





ΜΕΙΩΣΗ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ
ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗΣ ΟΖΟΝΤΟΣ

1. Φωτοδιάσπαση του όζοντος
 $O_3 + \text{υπεριώδους ακτινοβολία} \rightarrow O_2 + O$
Το όζον είναι ισχυρός απορροφητής της υπεριώδους ακτινοβολίας (0.2-0.3 μm) διαμέσου της φωτοδιάσπασης

2. Διάσπαση του όζοντος
Περικλείει μια επανασύνδεση με το ατομικό οξυγόνο με τη βοήθεια καταλύτη (ένα υδροξύλιο)
 $H + O_3 \rightarrow OH + O_2$ και $OH + O \rightarrow H + O_2$ άρα $O_3 + O \rightarrow 2O_2$
Τα άτομα υδρογόνου και τα υδροξύλια προέρχονται από υδρατμούς, μοριακό οξυγόνο και μεθάνιο

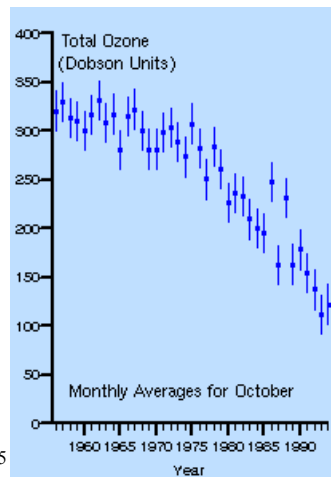
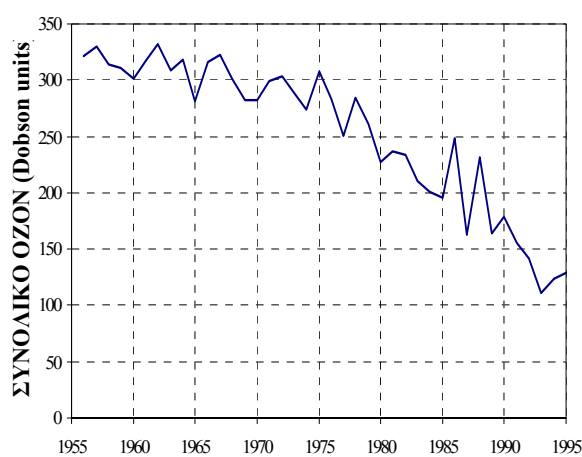
3. Αντίδραση με χλώριο και οξείδια του αζώτου
Στη στρατόσφαιρα το όζον καταστρέφεται από οξείδια του αζώτου (NO_x, NO, NO_2) και ρίζες χλωρίου (Cl, ClO). Τα πρώτα προέρχονται από το N_2O και τα δεύτερα από τους χλωροφθοράνθρακες. Και τα δύο αέρια μεταφέρονται στη στρατόσφαιρα όπου το πρώτο οξειδώνεται, ενώ οι δεύτεροι από την υπεριώδη γίνονται ρίζες χλωρίου

Κατόπιν
 $2(Cl + O_3) \rightarrow ClO + O_2$ και $CO + ClO \rightarrow ClO_2$
και $Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$ και $OH + O_3 \rightarrow HO_2 + O_2$
και οι δύο αντιδράσεις οδηγούν στην αφαίρεση του όζοντος και του ατομικού οξυγόνου

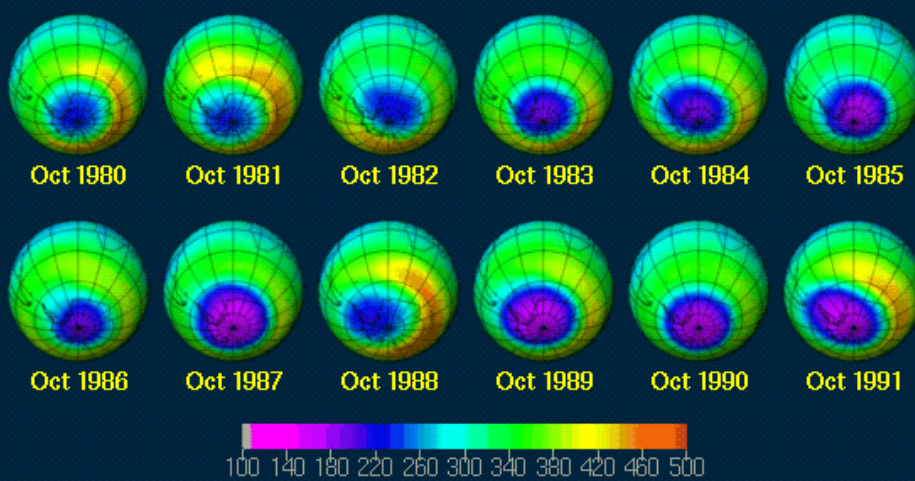
ΜΕΙΩΣΗ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ

ΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΟΖΟΝΤΟΣ ΟΚΤΩΒΡΙΟΥ (1956-1995)

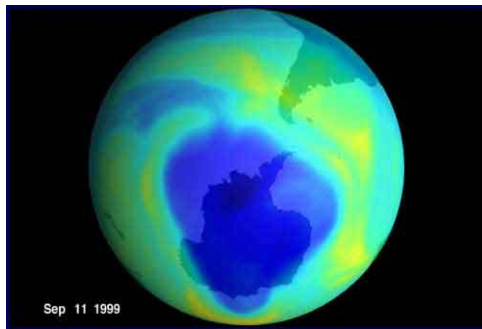
(μετρήσεις Halley Bay, Ανταρκτική)



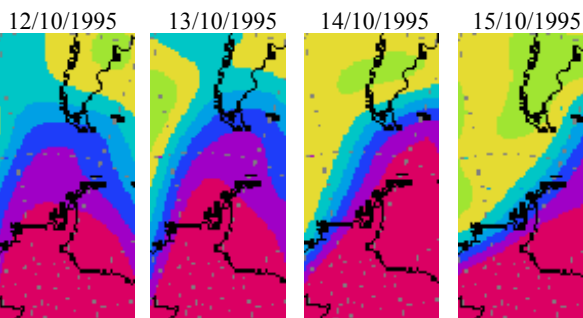
ΜΕΙΩΣΗ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ



ΜΕΙΩΣΗ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ

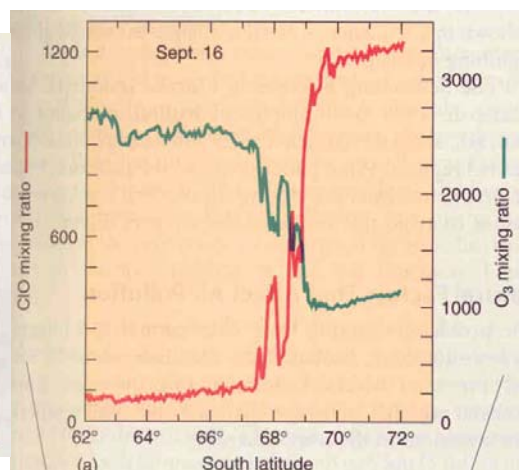
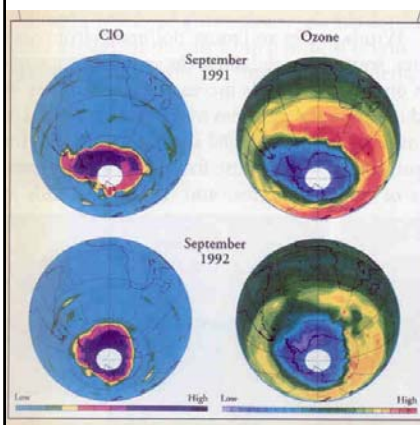


Η μείωση του όζοντος στην Ανταρκτική στις 11/9/1999 όπως φαίνεται από δορυφόρους της NASA (τα χαμηλά επίπεδα φαίνονται με μπλε). Η τρύπα αναπτύσσεται μεταξύ τέλος Αυγούστου και αρχών Οκτωβρίου



Δορυφορικές φωτογραφίες της μείωσης του όζοντος από 12-15/10/1995. Με σκούρο μπλε το κρίσιμο όριο της συγκέντρωσης (210-240 μονάδες Dobson)

ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΟΖΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΩΣΕΩΝ ΧΛΩΡΙΟΥ



Πηγή: Christopherson, 2000