

Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

«Υπερθέρμανση του θερμοκηπίου» ή «Υπερθέρμανση του πλανήτη»: Όροι που περιγράφουν το γεγονός ότι η μέση θερμοκρασία του αέρα αναμένεται να αυξηθεί κατά αρκετούς βαθμούς λόγω της συσσώρευσης διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα.

Οι περισσότεροι επιστήμονες θεωρούν ότι η υπερθέρμανση του πλανήτη είναι ήδη σε εξέλιξη εδώ και αρκετό καιρό και είναι σε μεγάλο βαθμό υπεύθυνη για την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα κατά $0,66^{\circ}\text{C}$ από το 1860.

Το φαινόμενο της υπερθέρμανσης του πλανήτη είναι ένα κρίσιμο παγκόσμιο περιβαλλοντικό πρόβλημα το οποίο απαιτεί προσαρμογές μεγάλης κλίμακας, παρ' όλο που σε τοπικό επίπεδο τα αποτελέσματά του μπορεί να είναι είτε θετικά είτε αρνητικά.

Δεν υπάρχει βεβαιότητα για την έκταση ή το χρόνο των μελλοντικών αυξήσεων της θερμοκρασίας.

Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τους παράγοντες που οδηγούν στην αύξηση για την έγκαιρη λήψη μέτρων.

Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Η πηγή ενέργειας της Γης

Η επιφάνεια και η ατμόσφαιρα της Γης διατηρούνται ζεστές σχεδόν αποκλειστικά από ενέργεια που προέρχεται από τον Ήλιο, ο οποίος εκπέμπει φωτεινή ενέργεια σε ένα μεγάλο εύρος ενεργειών (μηκών κύματος).

Ο Ήλιος μπορεί να θεωρηθεί ότι συμπεριφέρεται ως μαύρο (ή μέλαν) σώμα δηλ. ως ένα αντικείμενο που είναι 100% αποτελεσματικό στην εκπομπή και την απορρόφηση του φωτός.

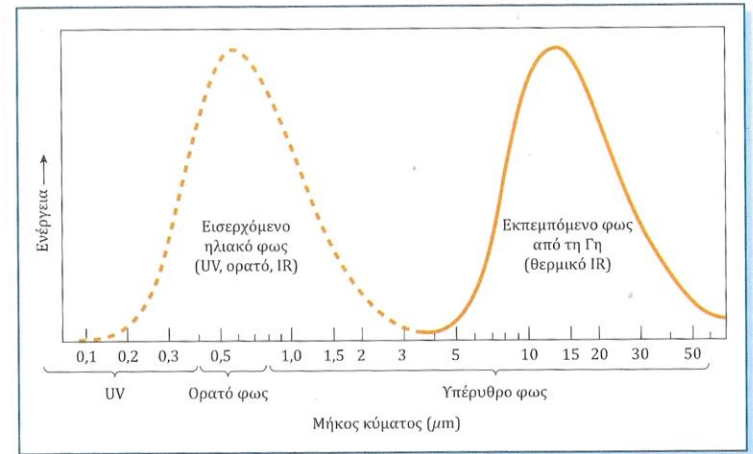
Το μήκος κύματος (σε μm) στο οποίο εμφανίζεται η μέγιστη εκπομπή ενέργειας από ένα ακτινοβολών μαύρο σώμα είναι αντιστρόφως ανάλογο με την θερμοκρασία (T σε K) και δίνεται από τη σχέση $\lambda_{\text{max}} = 2897/T$.

Έτσι δεδομένου ότι η επιφανειακή θερμοκρασία του Ήλιου είναι $T \approx 5.800 \text{ K}$, προκύπτει $\lambda_{\text{max}} \approx 0.50 \mu\text{m}$ (ορατό πράσινο φως).

Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Όπως φαίνεται από το διπλανό σχήμα, η μέγιστη παρατηρούμενη ηλιακή εκπομπή είναι μεταξύ 0.40 (ιώδες) και 0.75 μm (ερυθρό) που αντιστοιχεί στο ορατό φως. Η Γη δέχεται επίσης από τον ήλιο υπέρυθρο φως (Infrared, IR) σε μήκη κύματος 0.75 – 4 μm πέρα από το ορατό φως. Πέρα από το «ιώδες όριο», σε μήκη κύματος μικρότερα από 0,4 μm , βρίσκεται το υπεριώδες φως (Ultraviolet, UV) και αντιστοιχεί σε ένα μικρό τμήμα του ηλιακού φωτός που φτάνει στη Γη



Από το συνολικό εισερχόμενο στη Γη φως του ήλιου (όλα τα λ):

≈ 50% απορροφάται στην επιφάνεια της Γης (υδάτινες μάζες, έδαφος, βλάστηση, κ.α.)

≈ 20% απορροφάται από σταγονίδια νερού στον αέρα (κυρίως στα νέφη) και από τα μόρια διαφόρων αερίων (το UV από το στρατοσφαιρικό O_3 και το O_2 , το υπέρυθρο από τους υδρατμούς και το CO_2).

≈ 30% ανακλάται πίσω στο διάστημα χωρίς να απορροφηθεί (σύννεφα, αιωρούμενα σωματίδια, πάγος, χιόνι, κ.α.)

Λευκαύγεια (albedo): Το κλάσμα του ηλιακού φωτός που ανακλάται στο διάστημα.

Καλοί ανακλαστήρες: Σύννεφα, χιόνι, πάγος (υψηλές λευκαύγειες)

Φτωχοί ανακλαστήρες: Γυμνό έδαφος, υδάτινα σώματα

Η τήξη του θαλάσσιου πάγου σε πολικές περιοχές και η αντικατάστασή του με επιφάνειες νερού αυξάνει σημαντικά το κλάσμα του ηλιακού φωτός που απορροφάται εκεί και μειώνει τη συνολική λευκαύγεια της Γης.

Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

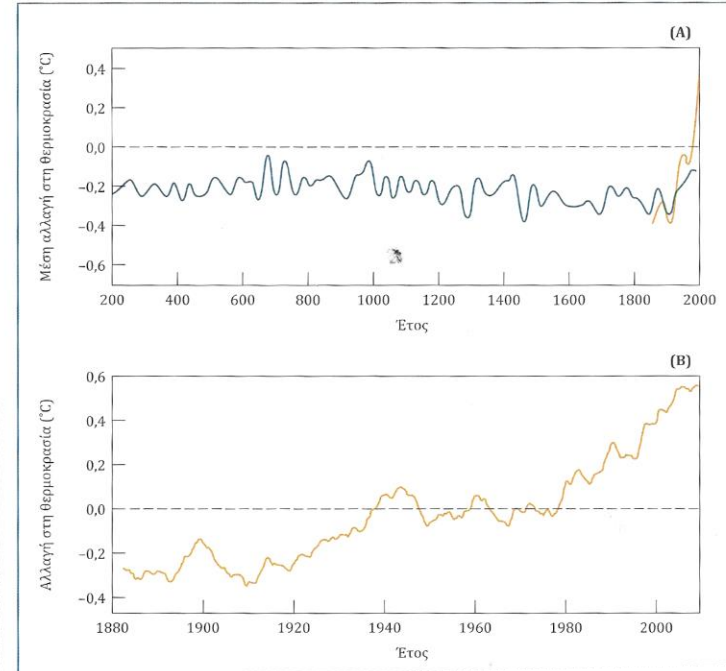
Ιστορικές θερμοκρασιακές τάσεις

Οι τάσεις των μεταβολών της μέσης επιφανειακής θερμοκρασίας τα τελευταία 2000 χρόνια, μέσω έμμεσων ενδείξεων, παρουσιάζονται στο διπλανό σχήμα. Μέχρι και την έναρξη της βιομηχανικής επανάστασης υπήρχε πτωτική τάση. Μετά το 1880 (βλ. (B)) αρχίζει η ανοδική τάση.

Από το τέλος της δεκαετίας 1970 έως σήμερα υπάρχει μια συστηματική τάση ανόδου που έχει ανέλθει σε $\approx 0,6^{\circ}\text{C}$. Αυτή η αύξηση αποδίδεται σχεδόν εξ ολοκλήρου σε ανθρωπογενείς επιρροές.

Ο ρυθμός θέρμανσης ανά δεκαετία για τα τελευταία, 150, 100, 50 και 25 έτη είναι αυξητικός.

Περίοδος	Διάρκεια Περιόδου (έτη)	Ρυθμός Θέρμανσης ανά Δεκαετία
1856–2005	150	0,045°C
1906–2005	100	0,074°C
1956–2005	50	0,128°C
1981–2005	25	0,177°C



Οι εκπομπές ενέργειας της Γης και το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

Όπως κάθε θερμό σώμα, η Γη εκπέμπει ενέργεια. Η ενέργεια αυτή είναι σε μήκη κύματος μεταξύ $5\ \mu\text{m}$ έως και $\approx 50\ \mu\text{m}$ και ανήκει στην λεγόμενη **θερμική υπέρυθρη περιοχή**.

Τα υπέρυθρο φως εκπέμπεται τόσο από την επιφάνεια της Γης όσο και από την ατμόσφαιρά της, αν και σε διαφορετικές ποσότητες στα διάφορα υψόμετρα καθώς για ένα μαύρο σώμα ισχύει ότι

$$\text{Ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας} = k \cdot T^4 \text{ (Τ σε Κ)}$$

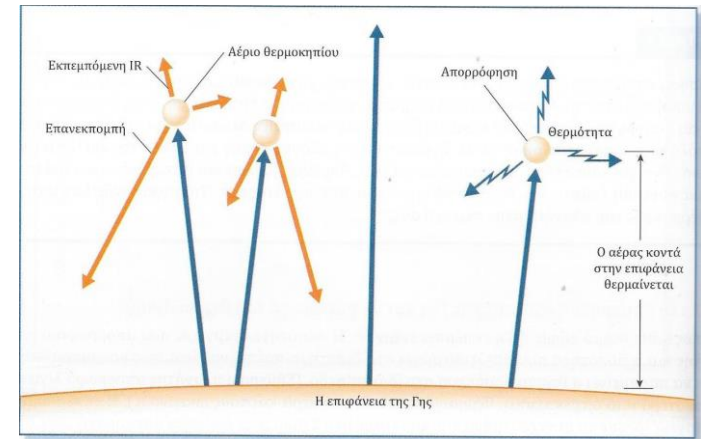
Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Οι εκπομπές ενέργειας της Γης και το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

Η ακτινοβολία IR που εκπέμπεται από την επιφάνεια και την ατμόσφαιρα της Γης δεν διαφεύγει όλη απευθείας στο διάστημα επειδή ορισμένα αέρια της ατμόσφαιρας (όπως για παράδειγμα οι υδατμοί, το CO_2), τα οποία ονομάζονται «αέρια θερμοκηπίου», απορροφούν θερμικό υπέρυθρο φως (σε χαρακτηριστικά μήκη κύματος).

Μετά την απορρόφηση ενός φωτονίου IR από το μόριο ενός αερίου θερμοκηπίου, αυτό μπορεί είτε να επανεκπεμφθεί εκ νέου (αριστερό σχήμα) ή να αναδιανεμηθεί ως θερμότητα μεταξύ μορίων που συγκρούονται με το μόριο που την απορρόφησε αρχικά (δεξί σχήμα) και τελικά να επανεκπεμφθεί εκ νέου ως IR ακτινοβολία από αυτά. Μέρος της επανεκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατευθύνεται προς την επιφάνεια της Γης και απορροφάται ξανά εκεί ή στον αέρα πάνω από αυτήν.



Η θερμοκρασία του αέρα τοπικά θερμαίνεται αλλά όχι απεριόριστα καθώς με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται και ο ρυθμός με τον οποίο απελευθερώνουν ενέργεια.

Συνολικά, οι θερμοκρασίες του αέρα αυξάνονται τόσο ώστε να αποκατασταθεί η πλανητική ισορροπία μεταξύ εισερχόμενης και εξερχόμενης ενέργειας.

Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Οι εκπομπές ενέργειας της Γης και το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

Το φαινόμενο της ανάσχεσης της εξερχόμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας από συστατικά της ατμόσφαιρας και η εξάπλωσή της ως θερμότητας για την αύξηση της θερμοκρασίας ονομάζεται **φαινόμενο θερμοκηπίου**.

Το φαινόμενο θερμοκηπίου είναι υπεύθυνο για τη μέση θερμοκρασία στην επιφάνεια της Γης και του αέρα κοντά σε αυτήν να είναι περίπου $+15^{\circ}\text{C}$ και όχι περίπου -18°C που θα ήταν αν δεν υπήρχαν τα αέρια που απορροφούν την IR ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα.

Αν δεν υπήρχε η φυσική λειτουργία του φαινομένου θερμοκηπίου ο πλανήτης θα καλυπτόταν από ένα παχύ στρώμα πάγου.

Αυτό που ανησυχεί τους επιστήμονες είναι ότι η αύξηση της συγκέντρωσης στην ατμόσφαιρα χημικών ενώσεων που απορροφούν θερμικό υπέρυθρο φως θα έχει ως αποτέλεσμα την απορρόφηση και τη μετατροπή σε θερμότητα ενός ακόμη μεγαλύτερου μέρους της εξερχόμενης θερμικής υπέρυθρης ακτινοβολίας από ό,τι σήμερα, ώστε η μέση θερμοκρασία της Γης να αυξηθεί πολύ πιο πάνω από τους 15°C .

Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται **επιδείνωση του φαινομένου θερμοκηπίου**, ή **ανθρωπογενές φαινόμενο θερμοκηπίου** ή **τεχνητή υπερθέρμανση του πλανήτη**, για να διακρίνεται από το φυσικό φαινόμενο θερμοκηπίου.

Τα κύρια συστατικά της ατμόσφαιρας - N_2 , O_2 και Ar – **δεν** απορροφούν υπέρυθρο φως.

Τα ατμοσφαιρικά αέρια τα οποία στο παρελθόν παρήγαγαν το μεγαλύτερο μέρος της θέρμανσης του θερμοκηπίου είναι **οι υδρατμοί (περίπου το 67% της επίδρασης)** και **το διοξείδιο του άνθρακα (περίπου το 25% της επίδρασης)**.

Έτσι, η απουσία νεφών και υδρατμών **στον ξηρό αέρα των ερημικών περιοχών οδηγούν σε χαμηλές νυχτερινές θερμοκρασίες**, καθώς τότε πολύ λίγη από την εξερχόμενη IR ακτινοβολία επιστρέφει στην επιφάνεια της Γης, παρόλο που οι θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι υψηλές λόγω της άμεσης απορρόφησης της ηλιακής ενέργειας από την επιφάνεια.

Στα εύκρατα κλίματα, οι νεφελώδεις νύχτες είναι συνήθως πιο ζεστές από εκείνες με ξαστεριά, επειδή τα σύννεφα εκπέμπουν την IR ακτινοβολία που έχουν απορροφήσει από την επιφάνεια της Γης.

Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

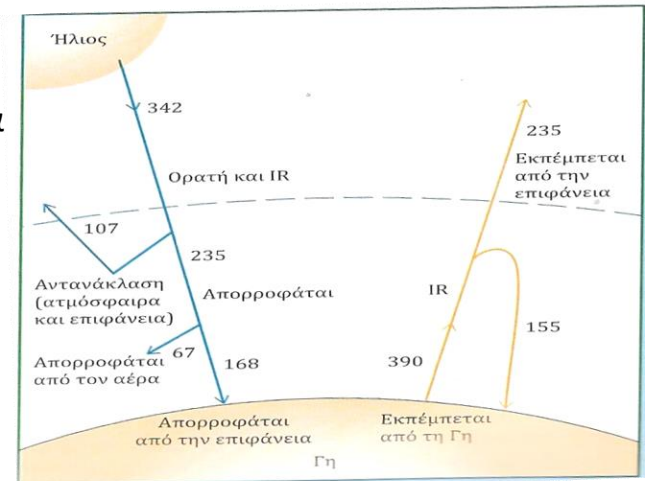
Ισοζύγιο ενέργειας της Γης

Οι ενεργειακές ροές (εισροές-εκροές) της Γης κατά μέσο όρο παγκοσμίως (σε W/m^2) δείχνονται στο διπλανό σχήμα.

Το ηλιακό φως μεταφέρει στα όρια της ατμόσφαιρας συνολικά 342 W/m^2 . Από αυτά, τα 107 ανακλώνται και τα υπόλοιπα δηλ. 235 W/m^2 απορροφώνται από την ατμόσφαιρα και την επιφάνεια του πλανήτη.

Κατά συνέπεια, για να διατηρήσει ο πλανήτης σταθερή θερμοκρασία πρέπει ισόποση ενέργεια ($= 235 \text{ W/m}^2$) να εκπέμπεται εκ νέου στο διάστημα.

Η Γη εκπέμπει από την επιφάνειά της 390 W/m^2 υπό μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας, από τα οποία τα 155 δεν διαφεύγουν στο διάστημα λόγω της παρουσίας των αερίων θερμοκηπίου και τα υπόλοιπα 235 όντως διαφεύγουν στο διάστημα.



Είναι ενδιαφέρον ότι μια αύξηση του CO_2 προβλέπεται ότι προκαλεί ψύξη της στρατόσφαιρας για δύο λόγους:

α) Περισσότερη εξερχόμενη θερμική IR ακτινοβολία απορροφάται χαμηλά στην ατμόσφαιρα (τροπόσφαιρα) οπότε λιγότερη απομένει για να απορροφηθεί και να θερμάνει αέρα της στρατόσφαιρας.

β) Στη στρατόσφαιρα, το μεγαλύτερο μέρος της απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας οφείλεται στο όζον και τους υδρατμούς, οπότε το CO_2 εκπέμπει περισσότερη θερμική IR ακτινοβολία σε σχέση με το πόση απορροφά.

Όντως, η παρατηρούμενη πειραματικά ψύξη της στρατόσφαιρας έχει ληφθεί ως ένδειξη ότι το φαινόμενο του θερμοκηπίου υφίσταται πράγματι επιδείνωση.

Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

ΜΟΡΙΑΚΕΣ ΔΟΝΗΣΕΙΣ: ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΑ ΑΕΡΙΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

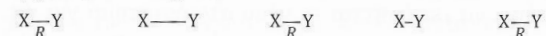
Το φως είναι πιθανότερο να απορροφηθεί από ένα μόριο όταν η συχνότητά του ταιριάζει με τη συχνότητα κάποιας εσωτερικής δόνησης μέσα στο μόριο.

Για συχνότητες στην περιοχή του υπέρυθρου (μήκη κύματος λ μεταξύ 4 – 50 μm) οι σχετικές συχνότητες δόνησης είναι αυτές της **τάνυσης** και της **κάμψης** των δεσμών μεταξύ των ατόμων του μορίου.

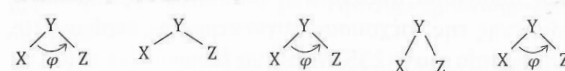
Δόνηση τάνυσης δεσμού: Ταλάντωση δύο συνδεδεμένων ατόμων X και Y με τη μεταξύ τους απόσταση R περιοδικά να αυξάνεται μεταξύ ενός μεγίστου και ενός ελαχίστου.

Η ακριβής συχνότητα της ταλάντωσης εξαρτάται από τον τύπο του δεσμού (απλός, διπλός, τριπλός) και το είδος των ατόμων. Έτσι ο **δεσμός C-F έχει συχνότητα τάνυσης που είναι εντός της θερμικής υπέρυθρης ακτινοβολίας** και κατά συνέπεια μόρια με τέτοιους δεσμούς μπορούν να απορροφήσουν φως IR και να επιδεινώσουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

(A) Δόνηση τάνυσης δεσμού



(B) Δόνηση κάμψης γωνίας

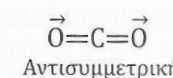
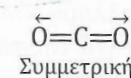


Δόνηση κάμψης γωνίας: Ταλάντωση στην απόσταση μεταξύ δύο ατόμων X και Z που συνδέονται με ένα κοινό άτομο Y αλλά όχι μεταξύ τους. Αυτή η κίνηση αλλάζει τη γωνία δεσμού XYZ μεταξύ μίας μέγιστης και μίας ελάχιστης τιμής. **Όλα τα μόρια που περιέχουν τρία ή περισσότερα άτομα έχουν δονήσεις κάμψης.**

Για να απορροφηθεί ένα υπέρυθρο φωτόνιο από ένα μόριο πρέπει κατά τη διάρκεια της δόνησης το **μόριο να αποκτά (προσωρινά) μη μηδενική διπολική ροπή**.

Κατ' αυτό τον τρόπο, για τα διατομικά ομοπυρηνικά μόρια (πχ N_2 , O_2) αυτό δεν μπορεί να συμβεί (επειδή ανά πάσα στιγμή η διπολική τους ροπή είναι πάντα μηδέν) και κατά συνέπεια δεν είναι δυνατόν για αυτά να απορροφήσουν υπέρυθρη ακτινοβολία.

Όμως για η δόνηση τάνυσης του δεσμού C=O στο CO_2 αυτό μπορεί να συμβεί στην αντισυμμετρική δόνηση (ο ένας δεσμός C=O συστέλλεται και ο άλλος διαστέλλεται) αλλά όχι στη συμμετρική (οι δύο δεσμοί C=O είτε συστέλλονται είτε διαστέλλονται ταυτόχρονα).



Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

ΜΟΡΙΑΚΕΣ ΔΟΝΗΣΕΙΣ: ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΑ ΑΕΡΙΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Στο μόριο CO_2 , η δόνηση κάμψης κατά την οποία τα τρία άτομα απομακρύνονται (προς στιγμήν) από μια γραμμική γεωμετρία είναι μια δόνηση που μπορεί να απορροφήσει το φως IR.

Γενικά, μόρια με τρία ή περισσότερα άτομα, ακόμα και αν είναι πολύ συμμετρικά με μηδενική μέση συνολική διπολική ροπή (όπως πχ. το CH_4) μπορούν να υποστούν δονήσεις (είτε τάνυσης είτε κάμψης) που «χαλάνε» προσωρινά αυτή τη συμμετρία και παράγουν μη μηδενική διπολική ροπή για το μόριο.

Πρόβλημα: Ποια από τα ακόλουθα μόρια μπορούν να απορροφήσουν υπέρυθρο φως λόγω εσωτερικών δονήσεων; H_2 , CO , Cl_2 , O_3 , CCl_4 , NO .

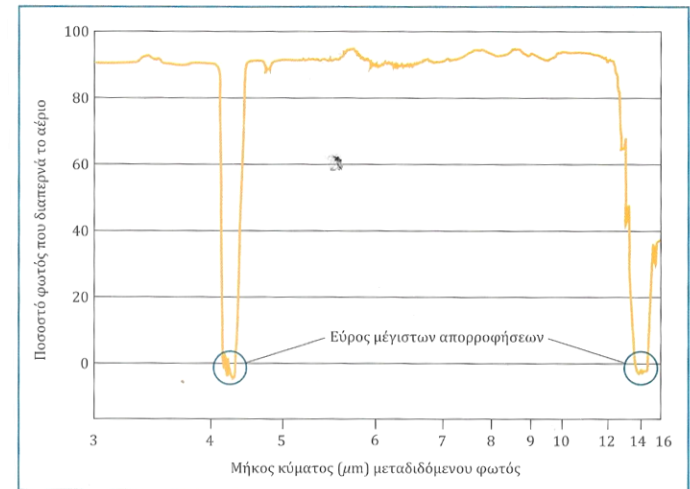
Αν κανένα από τα παραπάνω διατομικά μόρια δεν απορροφά μεγάλο μέρος του εξερχόμενου από τη Γη υπέρυθρου φωτός, τι μπορούμε να συμπεράνουμε για τις συχνότητες της δονητικής κίνησης των δεσμών αυτών των μορίων;

ΤΑ ΚΥΡΙΑ ΑΕΡΙΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Διοξείδιο του Άνθρακα: Απορρόφηση Υπέρυθρου Φωτός

Ένα μόριο απορροφά υπέρυθρο φως σε ένα εύρος συχνοτήτων γύρω από τη συχνότητα δόνησης και όχι σε μια μόνο συχνότητα. Αυτό συμβαίνει επειδή κατά την απορρόφηση ακτινοβολίας IR **αλλάζει και η περιστροφική ενέργεια** του μορίου.

Ειδικά για **το CO_2 το φάσμα απορρόφησης** της υπέρυθρης ακτινοβολίας δείχνεται στο διπλανό σχήμα. Παρατηρούνται δύο κορυφές απορρόφησης: Μία σε μήκος κύματος **$15.0 \mu\text{m}$** (συχνότητα $2 \times 10^{13} \text{ Hz}$) η οποία ταιριάζει με **τη δόνηση κάμψης** του OCO και μία σε **$\lambda = 4.26 \mu\text{m}$** ($7 \times 10^{13} \text{ Hz}$) που αντιστοιχεί στην **αντισυμμετρική δόνηση OCO** .



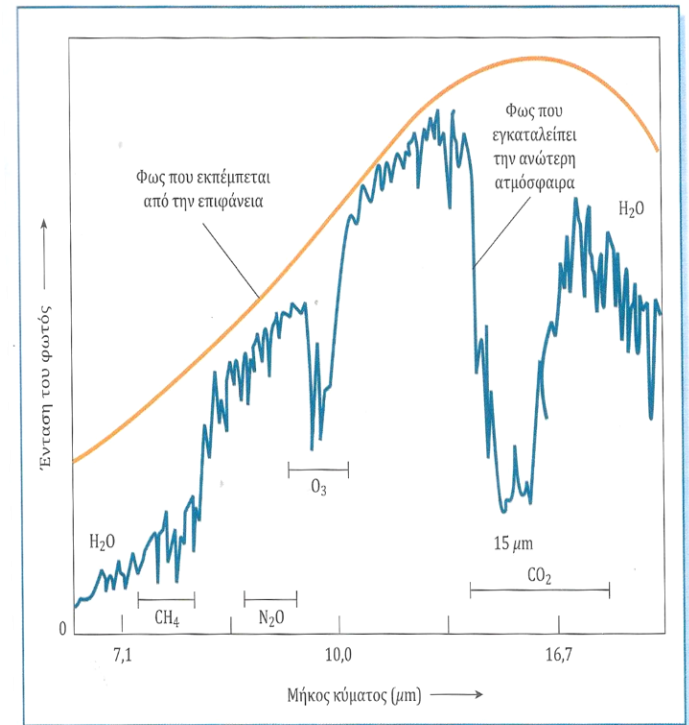
Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

ΤΑ ΚΥΡΙΑ ΑΕΡΙΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Διοξείδιο του Άνθρακα: Απορρόφηση Υπέρυθρου Φωτός

Στο διπλανό σχήμα φαίνεται η **θεωρητική καμπύλη εκπομπής υπέρυθρης ακτινοβολίας από τη Γη αν δεν υπήρχε απορρόφηση της από τα αέρια θερμοκηπίου** (πορτοκαλί) και η **πειραματικά μετρηθείσα καμπύλη της έντασης του υπέρυθρου φωτός που όντως εγκαταλείπει την ανώτερη ατμόσφαιρα** (μπλε). (Μέτρηση πάνω από την έρημο Σαχάρα)

Παρατηρούμε την **ισχυρή μείωση της έντασης του υπέρυθρου φωτός που εγκαταλείπει τη Γη στη περιοχή 14-16 μm** , μαζί με ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό και στις περιοχές 12-14 και 16-18 μm , το οποίο οφείλεται στην απορρόφηση από το CO_2 . Περίπου το μισό του εξερχόμενου IR από τη Γη απορροφάται. Το CO_2 απορροφά ισχυρά την IR ακτινοβολία και γύρω στα 4,3 μm αλλά σε αυτό το μήκος κύματος η ένταση της εκπεμπόμενης IR ακτινοβολίας από τη Γη είναι πολύ μικρή, οπότε αυτή η απορρόφηση από το CO_2 δεν παίζει σημαντικό ρόλο στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.



Διοξείδιο του Άνθρακα: Χρονική εξέλιξη εκπομπών και πηγές

Προβιομηχανικά (πριν περίπου το 1750) η συγκέντρωση του CO_2 στην ατμόσφαιρα υπολογίστηκε (μετρήσεις σε δείγματα αέρα παγιδευμένα σε πάγους της Ανταρκτικής) περίπου **280 ppm**.

Έως **το 2010**, η συγκέντρωση αυτή έφτασε στα **390 ppm ($\approx 40\%$ αύξηση)**.

Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

ΤΑ ΚΥΡΙΑ ΑΕΡΙΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Διοξείδιο του Άνθρακα: Χρονική εξέλιξη εκπομπών και πηγές

Δεκαετία 1960: Ρυθμός αύξησης $\approx 0,9$ ppm/έτος

Περίοδος 1975-2000: Ρυθμός αύξησης $\approx 1,6$ ppm/έτος

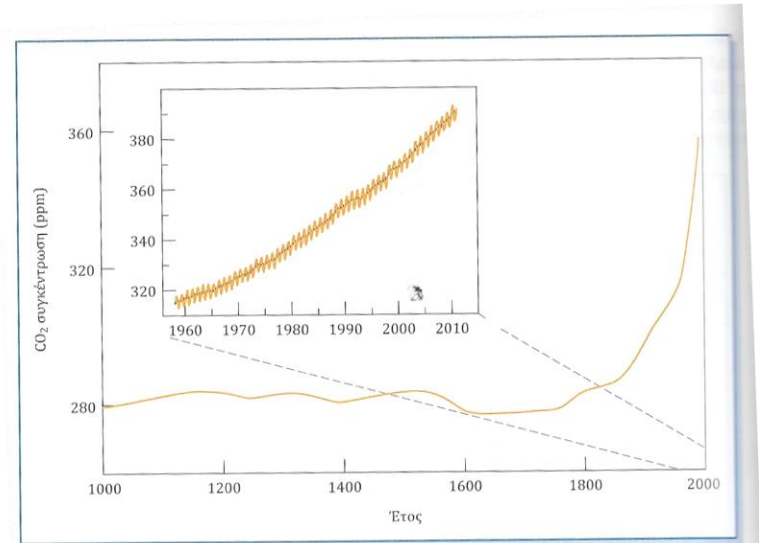
Περίοδος 2000-2010: Ρυθμός αύξησης $\approx 2,0$ ppm/έτος

Η εποχιακή διακύμανση οφείλεται στην ανάπτυξη της βλάστησης την άνοιξη και το καλοκαίρι που απομακρύνει το CO₂ από τον αέρα

(φωτοσύνθεση: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{φως} \rightarrow \text{O}_2 + \text{πολυμερές CH}_2\text{O}$)

και τον κύκλο αποσύνθεσης της βλάστησης το φθινόπωρο και το χειμώνα που απελευθερώνει CO₂ στον αέρα.

Κατά τη δέσμευση του με τη φωτοσύνθεση, το CO₂ δεν είναι πλέον διαθέσιμο για να δράσει ως αέριο θερμοκηπίου και ενσωματώνεται μέσα στο φυτό σε πολυμερισμένη μορφή (**σταθερός-packed άνθρακας**, κυρίως κυτταρίνη του ξύλου).



Ανθρωπογενείς συνεισφορές στην αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ στον αέρα:

- **Καύση ορυκτών καυσίμων** (γαιάνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) $\approx 75\%$
- **Αποψίλωση δασών** για την ελευθέρωση εκτάσεων γης για γεωργική χρήση $\approx 25\%$

Η αποψίλωση των δασών συνέβη σε μαζική κλίμακα σε εύκρατες κλιματικές ζώνες στο παρελθόν (εποικισμός των ΗΠΑ και του νότιου Καναδά) και τώρα έχει μετατοπιστεί κυρίως στις τροπικές περιοχές (Νότια Αμερική-Βραζιλία, Κεντρική Αμερική, Νοτιοανατολική Ασία).

Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

ΤΑ ΚΥΡΙΑ ΑΕΡΙΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Διοξείδιο του Άνθρακα: Χρόνος ζωής στην ατμόσφαιρα

Το μόριο του CO_2 δεν αποσυντίθεται χημικά ή φωτοχημικά (όπως τα περισσότερα αέρια) και για αυτό ο υπολογισμός του χρόνου ζωής του στην ατμόσφαιρα είναι μια πολύπλοκη υπόθεση και στην πράξη δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί.

Κατά μέσο όρο, μέσα σε λίγα χρόνια από την απελευθέρωσή του στον αέρα, ένα μόριο CO_2 θα διαλυθεί στο επιφανειακό θαλασσινό νερό ή θα απορροφηθεί από ένα αναπτυσσόμενο φυτό.

Αυτή η απομάκρυνση όμως είναι μόνο προσωρινή γιατί πραγματοποιούνται και αντίστροφες διαδικασίες (από τη βιομάζα και τους ωκεανούς) απελευθέρωσης μορίων CO_2 ξανά πίσω στον αέρα.

Ο μοναδικός μόνιμος αποδέκτης του CO_2 είναι η διάλυση του στα βαθιά νερά των ωκεανών (κάτω από τα πρώτα λίγα εκατοντάδες μέτρα) ή/και η καθίζηση ως αδιάλυτο ανθρακικό ασβέστιο (δημιουργία ιζημάτων). Αυτή όμως είναι μια πολύ αργή διαδικασία (της τάξεως των εκατοντάδων ετών).

Οι νέες εκπομπές CO_2 από τα ορυκτά καύσιμα κατανέμονται αρκετά γρήγορα μεταξύ του αέρα, των ρηχών νερών των ωκεανών και της βιομάζας, με συνεχή ανταλλαγή μεταξύ αυτών των τριών περιβαλλοντικών διαμερισμάτων. Στη συνέχεια, με αργό ρυθμό και σε βάθος χρόνου πολλών δεκαετιών έως και μερικών αιώνων, σχεδόν όλο αυτό το νέο CO_2 θα καταλήξει μόνιμα στον τελικό του αποδέκτη, τον βαθύ ωκεανό.

Λόγω των παραπάνω διαδικασιών, η ατμόσφαιρα απαλλάσσεται σχεδόν από το μισό του νεοεισερχόμενου CO_2 μέσα 10-20 έτη, αλλά απαιτείται πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (έως και 200 χρόνια) για να απομακρυνθεί και το υπόλοιπο.

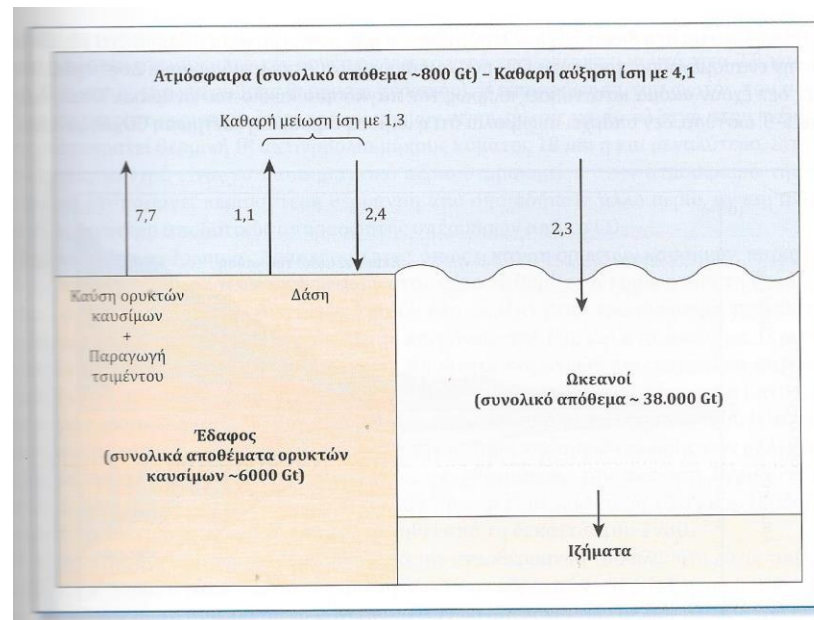
Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

ΤΑ ΚΥΡΙΑ ΑΕΡΙΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Διοξείδιο του Άνθρακα: Είσοδοι και έξοδοι

Το παρακάτω σχήμα δείχνει τις κατά μέσο όρο ετήσιες ροές (εισροές και εκροές) ανθρωπογενούς διοξειδίου του άνθρακα για την περίοδο 2000-2009 σε Gt (Gigatonne = 10^{12} kg = 10^{15} g – Petagram).

Επειδή λιγότερο από το ήμισυ των ανθρωπογενών εκπομπών CO₂ απομακρύνονται γρήγορα, σε βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη βάση, το CO₂ συνεχίζει και συσσωρεύεται στην ατμόσφαιρα με ένα μέσο ρυθμό 4,1 Gt/έτος.



Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

ΤΑ ΚΥΡΙΑ ΑΕΡΙΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Υδρατμοί

Τα μόρια του νερού σε αέρια κατάσταση (υδρατμοί) απορροφούν θερμική IR ακτινοβολία μέσω των **δονήσεων κάμψης H-O-H**.

Η κορυφή στο φάσμα απορρόφησης εμφανίζεται σε **$\lambda = 6,3 \mu\text{m}$** . Έτσι όλη σχεδόν η μικρή ποσότητα εκπεμπόμενης από τη Γη IR ακτινοβολίας στην περιοχή **$5,5 - 7,5 \mu\text{m}$** παρεμποδίζεται από τους υδρατμούς.

Επιπλέον, καθώς η απορρόφηση IR ακτινοβολίας από το νερό οδηγεί σε αύξηση και της περιστροφικής ενέργειας των μορίων του, αυτά απορροφούν ενέργεια και σε πιο μεγάλα μήκη κύματος της τάξης των **$18 \mu\text{m}$** (ενεργειακές μεταβάσεις μεταξύ περιστροφικών ενεργειακών σταθμών).

Το νερό είναι το πιο σημαντικό αέριο θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα της Γης, καθώς συνολικά παράγει περισσότερη θέρμανση από οποιοδήποτε άλλο αέριο, αν και ανά μόριο είναι ένας λιγότερο αποδοτικός απορροφητής υπερύθρων σε σχέση με το CO_2 .

Η συγκέντρωση των υδρατμών στον αέρα καθορίζεται κυρίως από τη **θερμοκρασία** και άλλες μετεωρολογικές παραμέτρους. Σχεδόν όλο το νερό στην τροπόσφαιρα προκύπτει από την **εξάτμιση** υγρού και στερεού νερού στην επιφάνεια της Γης και στα σύννεφα.

Ο ρυθμός εξάτμισης και η μέγιστη ποσότητα υδρατμών που μπορεί να συγκρατήσει μια μάζα αέρα αυξάνονται απότομα **με την αύξηση της θερμοκρασίας**.

Η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα λόγω της αύξησης της συγκέντρωσης των άλλων αερίων θερμοκηπίου θερμαίνει το επιφανειακό νερό και τον πάγο **οδηγώντας σε περισσότερη εξάτμιση**. → →

→ Η αύξηση της συγκέντρωσης των υδρατμών λόγω της αυξημένης εξάτμισης **οδηγεί σε επιπλέον αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα** επειδή και οι ίδιοι οι υδρατμοί είναι αέριο θερμοκηπίου.

Αυτό είναι παράδειγμα **θετικής ανάδρασης ή θετικής ανατροφοδότησης**: η λειτουργία ενός φαινομένου (στην περίπτωσή μας η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα) παράγει ένα αποτέλεσμα το οποίο επιδεινώνει περισσότερο το φαινόμενο.

Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

ΑΛΛΑ ΑΕΡΙΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Παρακάτω περιγράφονται μερικά επιπλέον αέρια θερμοκηπίου, των οποίων η συγκέντρωση είναι μικρή σε απόλυτες τιμές αλλά ακόμα και έτσι η ικανότητά τους να θερμάνουν τον ατμοσφαιρικό αέρα είναι σημαντική.

Μεθάνιο: Απορρόφηση και Αποδέκτες

Το μεθάνιο (CH_4) περιέχει τέσσερις δεσμούς C-H και συμμετρική τετραεδρική δομή. Οι δονήσεις τάνυσης των δεσμών C-H είναι εκτός της θερμικής IR περιοχής ($\lambda < 5 \mu\text{m}$), όμως **οι δονήσεις κάμψης των δεσμών H-C-H απορροφούν στα $7,7 \mu\text{m}$ που βρίσκεται στο κάτω άκρο του θερμικού IR παραθύρου**. Κατά συνέπεια το CH_4 απορροφά IR ακτινοβολία σε αυτή τη φασματική περιοχή.

Σε αντίθεση με το CO_2 του οποίου οι εκπομπές έχουν χρόνο ζωής σχεδόν έναν αιώνα, **τα μόρια του μεθανίου στον αέρα έχουν μέσο χρόνο ζωής λίγο μικρότερο από 10 έτη**.

Η κύρια διαδικασία απομάκρυνσης του CH_4 από την ατμόσφαιρα ($\approx 90\%$) είναι η αντίδρασή του με τις πολύ δραστικές ρίζες υδροξυλίου OH.

Ανά μόριο, το CH_4 θεωρείται πιο επιδραστικό στην αύξηση της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα σε σχέση με το CO_2 . Όμως λόγω του μικρότερου χρόνου ζωής του καθώς και της πολύ μεγαλύτερης, συγκριτικά, αύξησης των εκπομπών του CO_2 , **ο ρόλος του μεθανίου στη θέρμανση της ατμόσφαιρας είναι λιγότερο σημαντικός**. Εκτιμάται ότι η συμμετοχή του μεθανίου στην τωρινή υπερθέρμανση του πλανήτη είναι το $1/3$ εκείνης του διοξειδίου του άνθρακα.

Μεθάνιο: Πηγές εκπομπών

Φυσικές πηγές: Αντιστοιχούν περίπου στο **30% των συνολικών εκπομπών μεθανίου**.

Η κύρια φυσική πηγή μεθανίου ($\approx 25\%$) είναι μέσω **της αποσύνθεσης των φυτών μέσω αναερόβιας αποικοδόμησης** δηλαδή αποσύνθεσης της πρώην ζωντανής ύλης υπό συνθήκες έλλειψης οξυγόνου.

Η αναερόβια αποικοδόμηση πραγματοποιείται σε πολύ μεγάλη κλίμακα σε τόπους όπου η αποσύνθεση πραγματοποιείται **σε συνθήκες επικάλυψης από νερό**, π.χ. **φυσικούς υγροτόπους** όπως βάλτους και έλη.

Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

ΑΛΛΑ ΑΕΡΙΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Μεθάνιο: Πηγές εκπομπών

Ανθρωπογενείς πηγές: Παράγουν περίπου στο **70%** των συνολικών εκπομπών μεθανίου.

- 1) Υγρότοποι παραγωγής ρυζιού
- 2) Τεχνητή κατάκλιση της χέρσου για δημιουργία τεχνητών λιμνών για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Οι βαθιές, μικρές υδατοδεξαμενές παράγουν και εκπέμπουν πολύ λιγότερο μεθάνιο από ότι οι εκτεταμένες ρηχές τεχνητές λίμνες που περιέχουν μεγάλους όγκους πλημμυρισμένης βιομάζας ειδικά αν τα δέντρα δεν έχουν πρώτα απομακρυνθεί.
- 3) Αναερόβια αποσύνθεση της οργανικής ύλης των απορριμμάτων στους χώρους υγειονομικής ταφής και τις χωματερές. Οφείλεται κυρίως στα υπολείμματα τροφίμων. Η συλλογή και καύση του μεθανίου σε αυτούς τους χώρους για την παραγωγή θερμικής ενέργειας είναι μια αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος. Η καύση μεθανίου παρέχει ίσο αριθμό μορίων διοξειδίου του άνθρακα αλλά ανά μόριο η επίδραση του CO₂ στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι μικρότερη σε σχέση με εκείνη του CH₄. Έτσι η καθαρή επίδραση των εκπομπών στο φαινόμενο θερμοκηπίου είναι μειωμένη.
- 4) Καύση βιομάζας των δασών και λιβαδιών σε τροπικές και ημιτροπικές περιοχές
- 5) Κτηνοτροφία μηρυκαστικών ζώων (βοοειδή, πρόβατα, βουβάλια, κ.α.). Παράγουν τεράστιες ποσότητες μεθανίου στο στομάχι τους κατά τη χώνευση της κυτταρίνης στην τροφή τους, το οποίο απεκκρίνεται.
- 6) Διαρροές στους αγωγούς φυσικού αερίου, διαφυγή παγιδευμένου CH₄ μέσα σε γαιάνθρακα κατά την εξόρυξη του τελευταίου, απελευθέρωση ή ελλιπής ανάφλεξη διαλυμένων αερίων στο αργό πετρέλαιο κατά τη συλλογή ή διύλιση του τελευταίου.

Τρέχουσα σχετική σημασία ανθρωπογενών πηγών:

Παραγωγή ενέργειας/διανομή $\approx$ μηρυκαστικά ζώα > παραγωγή ρυζιού $\approx$ καύση βιομάζας $\approx$ ΧΥΤΑ

Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

ΑΛΛΑ ΑΕΡΙΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Υποξείδιο του Αζώτου

Το υποξείδιο του αζώτου (N_2O) έχει γραμμική δομή NNO . Οι δονήσεις κάμψης απορροφούν σε μια ζώνη γύρω στα **8,6 μm** και μία από τις δονήσεις τάνυσης είναι κεντραρισμένη στα **7,8 μm** .

Αν μόριο που ελευθερώνεται, το N_2O είναι **206 φορές πιο δραστικό από το CO_2 όσον αφορά στο δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη**. Ο ατμοσφαιρικός χρόνος ζωής του είναι περίπου **120 χρόνια**.

Δεν υπάρχουν μηχανισμοί καταστροφής του N_2O στην τροπόσφαιρα και για αυτό όλο το N_2O καταλήγει τελικά στη στρατόσφαιρα όπου αποσυντίθεται με την απορρόφηση υπεριώδους φωτός.

Η μέση συγκέντρωση του N_2O μέχρι και την προβιομηχανική εποχή ήταν σταθερή και γύρω στα **275 ppb** και κατόπιν άρχισε σταδιακά να αυξάνεται και το 2010 έφτασε στα **323 ppb**.

Φυσικές πηγές: Αποτελούν το **60-70%** των συνολικών εκπομπών. Διεργασίες που συμβαίνουν **στους ωκεανούς και στα εδάφη ειδικά στις τροπικές περιοχές**. Το N_2O είναι υποπροϊόν των φυσικών βακτηριακών διαδικασιών της νιτροποίησης [οξείδωση ανηγμένου αζώτου NH_3 , NH_4^+ σε νιτρώδη (NO_2^-) και νιτρικά (NO_3^-)] αλλά και της απονιτροποίησης [αναγωγή NO_3^- σε μοριακό άζωτο (N_2)].

Ανθρωπογενείς πηγές: Αποτελούν το **30-40%** των συνολικών εκπομπών.

Χρήση **νιτρικών και αμμωνιακών λιπασμάτων** – Αποσύνθεση της παραγόμενης από ζώα **κοπριάς υπό αερόβιες συνθήκες** συμπεριλαμβανομένης της χρήσης της ως λίπασμα – Χρήση **ορυκτών καυσίμων που περιέχουν άζωτο** (γαιάνθρακας και βιομάζα) – κάποιες βιομηχανικές διεργασίες

Οι χλωροφθοράνθρακες και οι υποκαταστάτες τους

Οι χλωροφθοράνθρακες μέσω των δονήσεων τάνυσης των δεσμών C-F και C-Cl καθώς και δονήσεων κάμψης, **απορροφούν έντονα στην περιοχή του παραθύρου IR μεταξύ 8-13 μm** . Επιπλέον, έχουν **πολύ μεγάλο χρόνο παραμονής** στην τροπόσφαιρα καθώς είναι ιδιαίτερα σταθερά μόρια.

Έτσι ένα μόριο CFC έχει τη δυνατότητα να προκαλέσει την ίδια υπερθέρμανση του πλανήτη όπως **δεκάδες χιλιάδες μόρια CO_2** .

Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

ΑΛΛΑ ΑΕΡΙΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Οι χλωροφθοράνθρακες και οι υποκαταστάτες τους

Ωστόσο η καθαρή επίδραση των CFC στην παγκόσμια θερμοκρασία είναι μικρή καθώς η θέρμανση που παράγουν με την απορρόφηση IR ακτινοβολίας ακυρώνεται εν μέρει από ένα ξεχωριστό φαινόμενο, την ψύξη που προκαλούν στην στρατόσφαιρα λόγω της καταστροφής του όζοντος.

Λόγω της απαγόρευσης της παραγωγής τους (Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ) η επιρροή των CFC στο κλίμα αναμένεται να μειωθεί στο μέλλον.

Τα μόρια τύπου HCFC και HFC (αντικαταστάτες των CFC) έχουν (με εξαίρεση το ψυκτικό HFC-134a, CH_3CF_3) έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής στην ατμόσφαιρα και απορροφούν λιγότερο στην περιοχή 8-13 μm , οπότε αποτελούν μικρότερη θερμοκηπιακή απειλή ανά μόριο.

Μπορεί όμως να υπάρξει πρόβλημα αν τα επίπεδα παραγωγής και απελευθέρωσής τους αυξηθούν στις επόμενες δεκαετίες λόγω της αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού και της αυξανόμενης ευημερίας. Για το λόγο αυτό, δίνεται έμφαση στην χρήση τους σε αυστηρά κλειστά συστήματα ώστε να μην διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα και στην ανάκτησή τους πριν την τελική απόρριψη των σχετικών συσκευών.

Εξαφθοριούχο Θείο – SF_6

Ελάχιστα γνωστό αλλά σημαντικό αέριο θερμοκηπίου γιατί απορροφά πολύ αποτελεσματικά την IR ακτινοβολία.

Έχει δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη 23.900 φορές μεγαλύτερο από το CO_2 και είναι πολύ μακρόβιο στην ατμόσφαιρα (3200 χρόνια).

Χρήση στις επιχειρήσεις ηλεκτρισμού και στη βιομηχανία ημιαγωγών ως μονωτικό αέριο. Παλαιότερα ελευθερωνόταν στον αέρα κατά τη συνήθη συντήρηση του εξοπλισμού αλλά τώρα ανακυκλώνεται.

Πολύ χαμηλή συγκέντρωση μέχρι στιγμής – 7,0 ppt (2010) αλλά έχει τάση αύξησης.

Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

ΑΛΛΑ ΑΕΡΙΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Τροποσφαιρικό όζον

Το μόριο του όζοντος (O_3) έχει κυρτή δομή (μη γραμμική) και το κεντρικό οξυγόνο δεν είναι ισοδύναμο με τα ακραία άτομα οξυγόνου. Συγκεκριμένα το κεντρικό οξυγόνο έχει μεγαλύτερη ηλεκτρονική πυκνότητα σε σχέση με τα ακραία, οπότε **οι δύο δεσμοί O-O είναι ελαφρά πολικοί** (παρ' όλο που είναι ομοπυρηνικοί).

Έτσι η διπολική ροπή των μορίων O_3 αλλάζει κατά τη διάρκεια **της συμμετρικής δόνησης** και τα μόρια απορροφούν IR ακτινοβολία **σε μήκη κύματος μεταξύ 9-10 μm** . Η αντισυμμετρική δόνηση του O_3 εμφανίζεται στα 5,7 μm όπου υπάρχει πολύ μικρή εκπεμπόμενη IR ακτινοβολία από τη Γη. Η δόνηση κάμψης συμβαίνει στα 14,2 μm που είναι μια περιοχή που συμβάλλει έντονα το CO_2 .

Το όζον σχηματίζεται στην τροπόσφαιρα ως δευτερογενές προϊόν ανθρωπογενούς ρύπανσης και από φυσικές διεργασίες.

Ως αποτέλεσμα των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων τα επίπεδα του όζοντος στην τροπόσφαιρα πιθανότατα έχουν αυξηθεί από τους προβιομηχανικούς χρόνους. Υπάρχει μια εκτίμηση (αρκετά αβέβαιη) για συνεισφορά κατά περίπου 10% του όζοντος στην επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου.

ΟΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ

Συνειδητοποιείται όλο και περισσότερο ότι **τα αερολύματα εξουδετερώνουν ένα σημαντικό κλάσμα της αύξησης της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας η οποία οφείλεται στις ανθρωπογενείς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.**

Τα σωματίδια που έχουν μεγαλύτερη σημασία σε αυτό το πλαίσιο είναι εκείνα που εκπέμπονται στην **ανώτερη ατμόσφαιρα από ισχυρές ηφαιστειακές εκρήξεις** και εκείνα που εκπέμπονται **στη χαμηλότερη τροπόσφαιρα από βιομηχανικές διεργασίες.**

Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

ΟΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ

Η αλληλεπίδραση του φωτός με τα σωματίδια

Όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα τα ατμοσφαιρικά σωματίδια αλληλεπιδρούν με το φως είτε με **ανάκλαση** είτε με **απορρόφηση**.

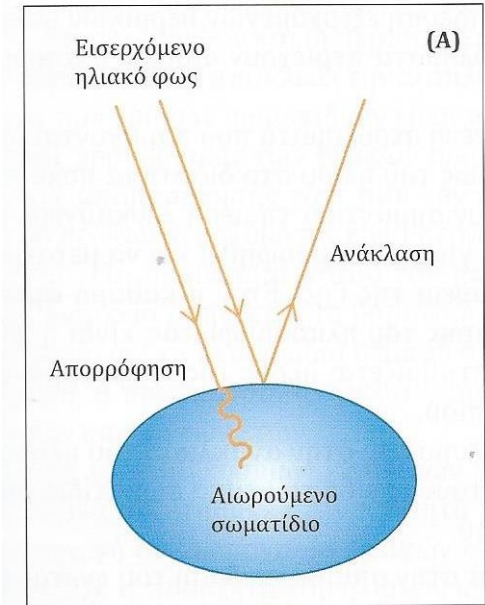
Σκέδαση: Όρος που χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει την αλλαγή κατεύθυνσης του φωτός από τη σύγκρουση με ένα σωματίδιο. Όταν η σκέδαση είναι προς τα πίσω ονομάζεται «οπισθοσκέδαση». Ο όρος «ανάκλαση» συνήθως ταυτίζεται με την «οπισθοσκέδαση».

Με την **ανάκλαση**, μέρος του εισερχόμενου ηλιακού φωτός επιστρέφει στο διάστημα και δεν απορροφάται από την επιφάνεια της Γης. Η **λευκαύγεια** (κλάσμα ηλιακού φωτός που ανακλάται από μια επιφάνεια) ορισμένων τύπων σωματιδίων έχει πολύ υψηλή τιμή. Με αυτό τον τρόπο, **το αερόλυμα ψύχει τη μάζα του αέρα και την επιφάνεια του εδάφους κάτω από αυτό.**

Από την άλλη πλευρά, ορισμένοι τύποι σωματιδίων αερολύματος μπορούν να **απορροφήσουν** συγκεκριμένα **μήκη κύματος ηλιακού φωτός**. Μετά την απορρόφησή του, το φως μετατρέπεται γρήγορα σε **θερμότητα**, η οποία στη συνέχεια διοχετεύεται στα γειτονικά μόρια αέρα ως αποτέλεσμα των **συγκρούσεών** τους με το θερμό σωματίδιο. Έτσι, η απορρόφηση του φωτός από ένα σωματίδιο οδηγεί σε **θέρμανση του αέρα που το περιβάλλει**.

Η απορρόφηση του ηλιακού φωτός είναι σημαντική μόνο από τα **σωματίδια τέφρας από ηφαίστεια** και τα **σωματίδια σκούρου χρώματος**, όπως εκείνα που αποτελούνται κυρίως από **αιθάλη** (ή **μαύρος άνθρακας**).

Η συνεισφορά του μαύρου άνθρακα στην υπερθέρμανση του πλανήτη έχει αναγνωριστεί και μελετηθεί σχετικά πρόσφατα. Η **ατμοσφαιρική διάρκεια ζωής των σωματιδίων μαύρου άνθρακα είναι μικρή σε σχέση με τα αέρια θερμοκηπίου (της τάξεως των εβδομάδων)** οπότε η επίδρασή τους στο κλίμα είναι **πιο προσωρινή**. Η εκπομπή αιθάλης-μαύρου άνθρακα στην ατμόσφαιρα είναι μεγαλύτερη **στις αναπτυσσόμενες χώρες** όπου η ατελής καύση άνθρακα και βιομάζας είναι πολύ πιο συνήθης.



Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

ΟΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ

Η αλληλεπίδραση του φωτός με τα σωματίδια

Θειϊκό αερόλυμα: Δημιουργείται λόγω της απελευθέρωσης **διοξειδίου του θείου** ως ρύπου από την καύση ορυκτών καυσίμων και από την τήξη μη σιδηρούχων μετάλλων.

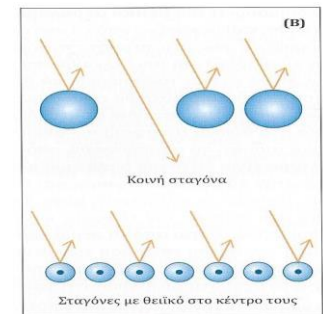
Τα **καθαρά θειϊκά αερολύματα δεν απορροφούν το ηλιακό φως** καθώς κανένα από τα συστατικά τους (νερό, θειϊκό οξύ, αμμωνιακά άλατα) δεν απορροφούν φως στην περιοχή του ορατού ή της UV-A ακτινοβολίας. Αν τα θειϊκά αερολύματα περιέχουν και αιθάλη, τότε μπορούν να απορροφήσουν ηλιακή ακτινοβολία. Επίσης τα θειϊκά αερολύματα δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά στην παγίδευση της εξερχόμενης από τη Γη θερμικής υπέρυθρης ακτινοβολίας.

Οπότε συνολικά, **τα πλούσια σε θειϊκά ανθρωπογενή αερολύματα** που παράγονται σε αφθονία ειδικά στο Βόρειο Ημισφαίριο, ανακλούν το φως του ήλιου στο διάστημα πολύ πιο αποτελεσματικά από ότι το απορροφούν και έτσι **αυξάνουν σημαντικά τη μέση λευκαύγεια της Γης**.

Έτσι, η **καθαρή άμεση επίδραση** των θειϊκών αερολυμάτων είναι η **ψύξη του αέρα** κοντά στο επίπεδο του εδάφους, **αντισταθμίζοντας** εν μέρει τη δράση των αερίων θερμοκηπίου.

Εκτός από την άμεση επίδραση, υπάρχουν και **έμμεσες επιδράσεις** των θειϊκών αερολυμάτων οι οποίες συμβάλλουν **στην ψύξη της επιφάνειας της Γης** ως εξής:

- Τα θειϊκά σωματίδια δρουν ως πυρήνες για το σχηματισμό μικρών σταγονιδίων νερού.
 - Τα μικρά σταγονίδια είναι πιο αποτελεσματικά στην ανάκλαση του φωτός από μια ίση μάζα μεγαλύτερων σταγονιδίων
- Τα μικρά σωματίδια είναι λιγότερο πιθανό να συσσωματωθούν σε σταγόνες βροχής. Κατά συνέπεια τα σύννεφά τους έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τα συνηθισμένα νέφη και μπορούν να αντανακλούν το ηλιακό φως για μεγαλύτερες περιόδους.



Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

ΟΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ

Η αλληλεπίδραση του φωτός με τα σωματίδια

Παράδειγμα βραχυπρόθεσμης δραματικής επίδρασης ατμοσφαιρικών αερολυμάτων στο κλίμα

Η έκρηξη του ηφαιστείου του όρου **Pinatubo στις Φιλιππίνες το 1991 οδήγησε** στην εκπομπή τεράστιας ποσότητας ουσιών στην τροπόσφαιρα και την στρατόσφαιρα.

Αρχικά, η κατώτερη στρατόσφαιρα **θερμάνθηκε** λόγω των **ηφαιστειακών σωματιδίων τέφρας**, τα οποία απορρόφησαν μέρος του ηλιακού φωτός μετατρέποντας το σε θερμότητα. Επιπλέον ανέκοψαν και την πορεία της εξερχόμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας από την επιφάνεια της Γης. Τα σωματίδια τέφρας δεν παρέμειναν για πολύ στη στρατόσφαιρα λόγω του μεγάλου μεγέθους τους (καθίζηση λόγω βαρύτητας).

Η οξείδωση **30 εκατομμυρίων τόνων SO_2** που εκπέμφθηκαν από το ηφαίστειο χαμηλότερα στην ατμόσφαιρα (εντός της τροπόσφαιρας) δημιούργησε **θειικό αερόλυμα** που μεταφέρθηκε στην στρατόσφαιρα και παρέμεινε εκεί για κάποια χρόνια, αντανakλώντας αποτελεσματικά το ηλιακό φως στο διάστημα.

Τα έτη 1992 και 1993 σημειώθηκε μια πτώση της παγκόσμιας μέσης επιφανειακής θερμοκρασίας κατά περίπου $0,2^{\circ}C$.

Πολλές περιοχές της Γης γνώρισαν αρκετά δροσερά καλοκαίρια στις αρχές της δεκαετίας του 1990.

Λόγω της σταδιακής καθίζησης του θειικού αερολύματος η Γη επέστρεψε στις θερμοκρασίες του 1990-91 το 1995.

Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΥ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Η **συσσώρευση μιας ουσίας**, όπως ένα αέριο θερμοκηπίου, **σε κάποιο περιβαλλοντικό διαμέρισμα**, όπως η ατμόσφαιρα, εξαρτάται **αφενός** από τον **ρυθμό R** με τον οποίο εισέρχεται από την πηγή (**ταχύτητα πρόσληψης = R**) και αφετέρου από τον μηχανισμό με τον οποίο απομακρύνεται.

Η πιο απλή περίπτωση είναι εκείνη όπου η αποβολή της ουσίας γίνεται σε έναν αποδέκτη με μια ταχύτητα η οποία είναι ανάλογη της συγκέντρωσης της ουσίας (**ταχύτητα αποβολής = kC**, όπου k=σταθερά ταχύτητας και C=συγκέντρωση της ουσίας).

Αρχικά η ταχύτητα αποβολής/απομάκρυνσης/απώλειας είναι μικρότερη από την ταχύτητα πρόσληψης, αλλά καθώς μεγαλώνει η συγκέντρωση της ουσίας η ταχύτητα αποβολής σταδιακά αυξάνει και κάποια στιγμή οι δύο ταχύτητες θα εξισωθούν. Μόλις επιτευχθεί αυτή η συνθήκη, η C δεν μεταβάλλεται πια και έχει φτάσει σε μια σταθερή κατάσταση (steady state) με τιμή C_{ss} .

Κατά συνέπεια ισχύει ότι $R = kC_{ss} \rightarrow C_{ss} = R/k$

Συχνά, η ταχύτητα απομάκρυνσης ή απώλειας μιας ουσίας εκφράζεται μέσω του μεγέθους του χρόνου ημίσειας ζωής, $t_{1/2}$, δηλ. του χρονικού διαστήματος που απαιτείται για να απομακρυνθεί η μισή ποσότητα μιας ουσίας με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχουν νέες εισροές.

Με λύση της διαφορικής εξίσωσης $dC/dt = -kC$ αποδεικνύεται ότι $t_{1/2} = 0,693/k \rightarrow 1/k = t_{1/2}/0,693 = 1,44t_{1/2}$

Έτσι καταλήγουμε στην τελική εξίσωση $C_{ss} = 1,44Rt_{1/2}$

Όσο μεγαλύτερη είναι η ημιζωή μιας ουσίας στη διαδικασία απομάκρυνσής της, τόσο υψηλότερη η συγκέντρωσή της σε σταθερή κατάσταση.

Κάθε ουσία (στην περίπτωσή μας ατμοσφαιρικό αέριο) που υπάρχει (ή είναι κοντά) σε σταθερή κατάσταση έχει το δικό της **χρόνο παραμονής (residence time)** στο περιβαλλοντικό διαμέρισμα (ατμόσφαιρα στην περίπτωση μας). Συμβολίζεται με t_{avg} και είναι ο μέσος χρόνος που ένα από τα μόρια του αερίου παραμένει στην ατμόσφαιρα πριν απομακρυνθεί. Αποδεικνύεται ότι $t_{avg} = 1/k = C_{ss}/R$

Όσο μεγαλύτερος ο χρόνος παραμονής μιας ουσίας τόσο μεγαλύτερη αναμένεται να είναι η επίδρασή της στην επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Αν μικρύνει ο ρυθμός πρόσληψης R, τότε θα μειωθεί η συγκέντρωση της ουσίας σε σταθερή κατάσταση. Οπότε παρ' όλο που ο χρόνος παραμονής (t_{avg}) δεν θα αλλάξει, η συνολική ποσότητα της ουσίας στην ατμόσφαιρα θα μικρύνει και κατά συνέπεια η συμβολή της στο φαινόμενο του θερμοκηπίου θα μειωθεί.