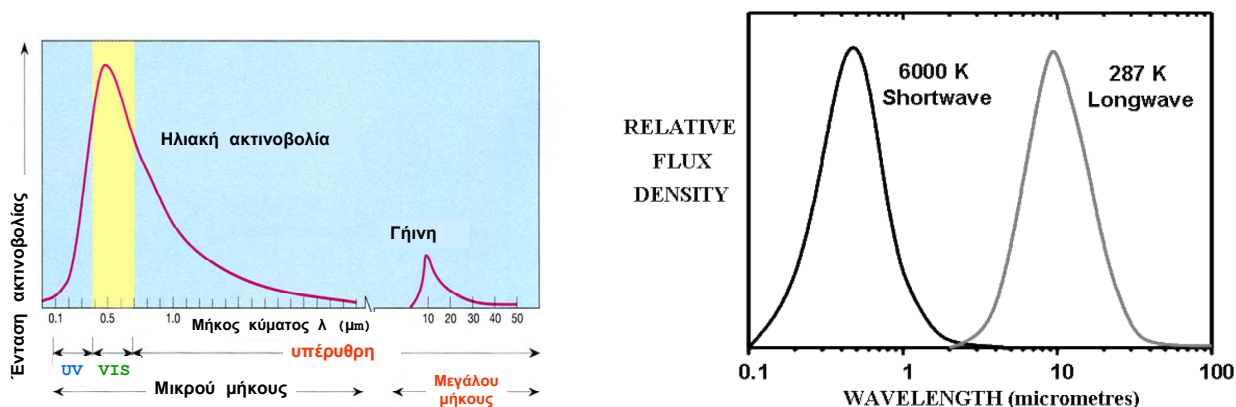


# Μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία - Φαινόμενο του θερμοκηπίου

## 1. Ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος

Ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος ή γενικά θερμική ακτινοβολία καλείται η ακτινοβολία της οποίας το φάσμα περιλαμβάνεται μεταξύ των μηκών κύματος  $4.0 \mu\text{m} < \lambda < 100 \mu\text{m}$ . Το σύστημα «γη-ατμόσφαιρα» απορροφά περίπου το 70% της ηλιακής ακτινοβολίας και για μεγάλες χρονικές περιόδους η θερμοκρασία του συστήματος δεν παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές. Προϋπόθεση για να ισχύει το πιο πάνω είναι η ενέργεια που απορροφάται να επιστρέφει στο διάστημα (μέσω εκπομπής).

Με τον όρο «γήινη ακτινοβολία» νοείται το σύνολο των ακτινοβολιών που εκπέμπονται από την επιφάνεια της γης και τη γήινη ατμόσφαιρα (Σχήμα α). Η γήινη ακτινοβολία μπορεί να θεωρηθεί σαν ακτινοβολία «μέλανος σώματος». Θεωρώντας μέγιστη και ελάχιστη επιφανειακή θερμοκρασία της γης  $< 80^\circ\text{C}$  και  $> -70^\circ\text{C}$  αντίστοιχα, με εφαρμογή του νόμου του Planck προκύπτει ότι τα φάσμα της γήινης ακτινοβολίας αρχίζει πρακτικά από  $\lambda > 1.5 \mu\text{m}$  και τελειώνει στο  $\lambda < 100 \mu\text{m}$ . Ειδικά η γη (μέση θερμοκρασία  $15^\circ\text{C}$ ) μπορεί να θεωρηθεί ως μέλαν σώμα θερμοκρασίας περίπου  $287^\circ\text{K}$ , του οποίου το φάσμα κυμαίνεται από  $4 \mu\text{m}$  ως  $100 \mu\text{m}$  (Σχήμα β). Σύμφωνα με το νόμο του Wien, το μέγιστο της έντασης της ακτινοβολίας θα αντιστοιχεί σε ακτινοβολία με μήκη κύματος  $\sim 10 \mu\text{m}$ . Σημειώνεται ότι το 99% της γήινης ακτινοβολίας βρίσκεται μεταξύ  $4 \mu\text{m}$  και  $80 \mu\text{m}$ , με μέγιστο στα  $10 \mu\text{m}$ .



Σχήμα 1. α) Φασματική κατανομή της ηλιακής και της γήινης ακτινοβολίας και β) πυκνότητα ενέργειας για μέλαν σώμα θερμοκρασίας  $T=6000 \text{ K}$  και  $T=287 \text{ K}$  που αντιστοιχούν στη μέση θερμοκρασία του ηλίου και της γης, αντίστοιχα.

## 1.1 Μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία από την επιφάνεια της γης

Όπως σε όλες τις φυσικές επιφάνειες, η εκπομπή ακτινοβολίας μικρών μηκών κύματος από την επιφάνεια της γης συνήθως παραλείπεται και η εκπομπή ακτινοβολίας μεγάλων μηκών κύματος δίνεται υπό την μορφή του τροποποιημένου νόμου των Stefan - Boltzmann.

$$I\uparrow = \epsilon_s \sigma T_s^4 \quad (1)$$

όπου  $\sigma$  είναι η σταθερά των Stefan - Boltzmann ίση με  $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ,  $\epsilon_s$  είναι ο συντελεστής εκπομπής μεγάλων μηκών κύματος της επιφάνειας και  $T_s$  η απόλυτη θερμοκρασία της επιφάνειας. Τυπικές τιμές του  $\epsilon_s$  για διάφορους τύπους επιφανειών αναφέρονται στη βιβλιογραφία και οι πιο χαρακτηριστικές δίνονται στον πίνακα 1. Εάν είναι γνωστή η θερμοκρασία και η ικανότητα εκπομπής της επιφάνειας της γης, μπορεί να εκτιμηθεί η  $I\uparrow$  από την εξίσωση (2.1) με ακρίβεια περίπου 10%. Δυσκολίες υπάρχουν στη μέτρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας ειδικότερα των φυτοκαλυμμένων επιφανειών. Σ' αυτές τις περιπτώσεις είναι ορθό να χρησιμοποιείται η "φαινόμενη θερμοκρασία επιφάνειας" ή η "ισοδύναμη θερμοκρασία μέλανος σώματος" ( $T_{eb}$ ) που θα προσδιορίζεται από μετρήσεις της υπέρυθρης ακτινοβολίας κοντά στην επιφάνεια (R), μέσω της εξίσωσης:  $R = \sigma T_{eb}^4$ .

**Πίνακας 1** Λευκαύγεια και συντελεστής εκπομπής διαφόρων φυσικών επιφανειών

Τύπος επιφάνειας	Άλλοι χαρακτηρισμοί	Λευκαύγεια $\alpha$	Συντελεστής εκπομπής $\epsilon_s$
Νερό	Μικρή ζενίθεια γωνία	0.03-0.10	0.92-0.97
	Μεγάλη ζενίθεια γωνία	0.10-0.50	0.92-0.97
Χιόνι	Παλαιό	0.40-0.70	0.82-0.89
	Νέο	0.45-0.95	0.90-0.99
Γυμνή άμμος	Ξηρή	0.35-0.45	0.84-0.90
	Υγρή	0.20-0.30	0.91-0.95
Γυμνό έδαφος	Ξηρό, πηλώδες	0.20-0.35	0.95
	Υγρό, πηλώδες	0.10-0.20	0.97
Οδόστρωμα	Τσιμεντένιο	0.17-0.27	0.71-0.88
	Από μαύρο χαλίκι	0.05-0.10	0.88-0.95
Γρασίδι	(0.02 m - 1 m)	0.16-0.26	0.90-0.95
Καλλιέργειες	Σίτου, ρυζιού κ.λ.π.	0.10-0.20	0.90-0.99
	Οπωροφόρων	0.15-0.20	0.90-0.95
Δάση	Φυλλοβόλα	0.10-0.20	0.97-0.98
	Κωνοφόρα	0.05-0.15	0.97-0.99

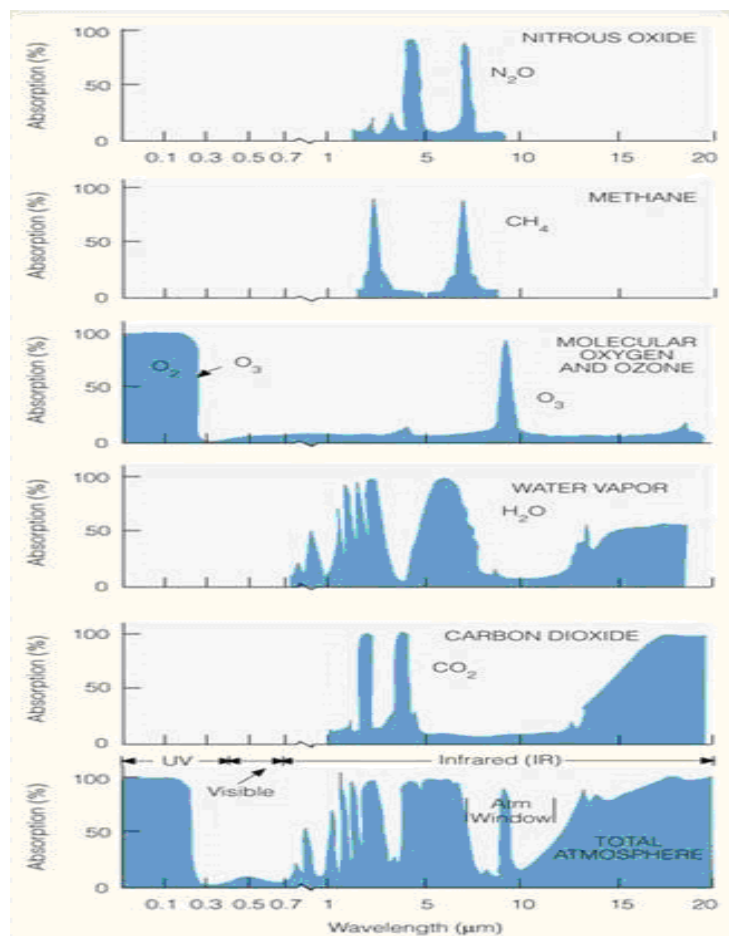
## 1.2 Μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία από την ατμόσφαιρα

Η γήινη ακτινοβολία ως ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος απορροφάται έντονα από τα συστατικά της ατμόσφαιρας με μεγάλο μοριακό βάρος όπως CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, και N<sub>2</sub>O (αέρια θερμοκηπίου). Αποτέλεσμα αυτής της απορρόφησης είναι η θέρμανση της γήινης ατμόσφαιρας να γίνεται κατά κύριο λόγο από την ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, δηλαδή την ατμοσφαιρική ακτινοβολία I<sub>↓</sub>. Στο Σχήμα δίνονται οι φασματικές απορροφήσεις της μεγάλης μήκους κύματος ακτινοβολίας από τα διάφορα συστατικά της ατμόσφαιρας. Όπως προκύπτει, τα διάφορα ατμοσφαιρικά αέρια απορροφούν κυρίως τη μεγάλη μήκους κύματος ακτινοβολία, αλλά εμφανίζουν και φασματική απορρόφηση στα μικρότερα μήκη κύματος που αντιστοιχούν στην ηλιακή ακτινοβολία. Στο Σχήμα 3. δίνεται η ατμοσφαιρική ακτινοβολία για ένα 24ωρο όπως μετρήθηκε από 7 πυργεόμετρα. Παρατηρείται ότι το μέγιστο και ελάχιστο της ατμοσφαιρικής ακτινοβολίας παρουσιάζονται το δεύτερο και πρώτο 12ωρο της ημέρας, αντίστοιχα.

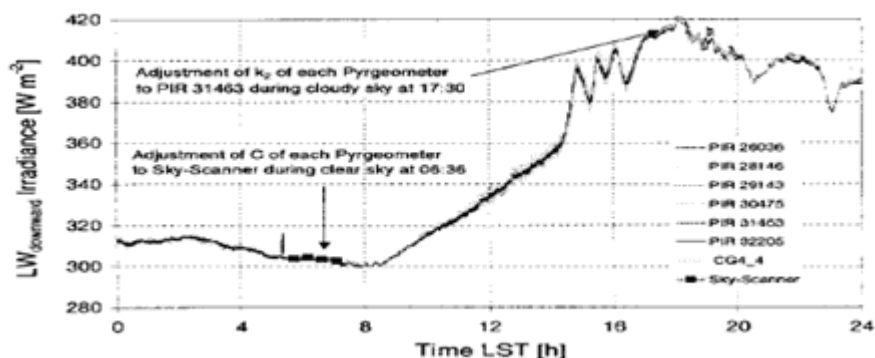
Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας εξαρτάται κατά μεγάλο μέρος από την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υδρατμούς (H<sub>2</sub>O), διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και άλλων επιμέρους συστατικών που εμφανίζουν απορρόφηση στο υπέρυθρο. Συνεπώς, μεταβολές των συστατικών αυτών θα έχουν σημαντικές επιπτώσεις στη θερμοκρασιακή κατάσταση της ατμόσφαιρας. Η φασματική περιοχή μεταξύ των μηκών κύματος 8 μm-13.5 μm μπορεί να θεωρηθεί διαφανής στη γήινη ακτινοβολία καθώς τα διάφορα συστατικά της ατμόσφαιρας στη συγκεκριμένη φασματική περιοχή παρουσιάζουν ήπια σχετικά απορρόφηση και είναι γνωστή ως «ατμοσφαιρικό παράθυρο». Μέσω αυτής της φασματικής περιοχής ένα σημαντικό ποσοστό της γήινης ακτινοβολίας διαφεύγει προς το διάστημα, ενώ το υπόλοιπο απορροφάται από την ατμόσφαιρα και χρησιμεύει για τη θέρμανσή της. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε, η περιοχή των 10 μm αντιστοιχεί στο μέγιστο της γήινης ακτινοβολίας. Αποτέλεσμα της απώλειας αυτής προς το διάστημα είναι η παρατηρούμενη κατά τις ανέφελες νύχτες σημαντική ψύξη των επιφανειακών στρωμάτων της ατμόσφαιρας. Αντίθετα, κατά τις νεφοσκεπείς

νύχτες δεν παρατηρείται σημαντική ψύξη επειδή η ύπαρξη των νεφών προκαλεί “κλείσιμο” του ατμοσφαιρικού παραθύρου.

Χωρίς ατμόσφαιρα, η ηλιακή ακτινοβολία θα έφθανε στην επιφάνεια της γης χωρίς εξασθένιση και θα θέρμαινε σημαντικά την επιφάνεια του πλανήτη μας. Όμως, εξαιτίας της έντονης θερμικής εκπομπής της γης, η θερμοκρασία θα ήταν αισθητά μειωμένη κατά ~30 βαθμούς μικρότερη από ό,τι είναι σήμερα, δηλαδή 255 °K ή διαφορετικά -18°C. Σύμφωνα με τις παρούσες συνθήκες, λόγω απορροφήσεων και επανεκπομπής της θερμικής ακτινοβολίας στη ατμόσφαιρα, η θερμοκρασία της γης παραμένει σημαντικά υψηλή γύρω (~ 15 °C ή 288 °K). Τα συστατικά που απορροφούν και επανεκπέμπουν αναφέρονται σαν αέρια του θερμοκηπίου π.χ. το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>), το όζον (O<sub>3</sub>), οι υδρατμοί (H<sub>2</sub>O), και το υποξείδιο του αζώτου (N<sub>2</sub>O).



Σχήμα 2. Φάσματα απορρόφησης βασικών ατμοσφαιρικών συστατικών



**Σχήμα 3.Η ατμοσφαιρική ακτινοβολία για ένα 24ωρο (24/9/1999) όπως μετρήθηκε από 7 πυργόμετρα.**

Οι πιο ακριβείς μέθοδοι υπολογισμού της ατμοσφαιρικής ακτινοβολίας ( $I_{\downarrow}$ ), απαιτούν γενικά, δεδομένα της κατακόρυφης κατατομής της υγρασίας, του  $CO_2$ , του  $O_3$  και της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας, καθώς και της νεφοκάλυψης, της φύσης και του ύψους των νεφών. Τέτοια δεδομένα δεν είναι συνήθως προσιτά εκεί που χρειάζεται η εκτίμηση της μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας. Έτσι, έχουν αναπτυχθεί απλούστερες μέθοδοι, που κυρίως βασίζονται σε μια εξίσωση της μορφής των Stefan-Boltzman:

$$I_{\downarrow} = \epsilon \sigma T_a^4 \quad (2)$$

όπου  $T_a$  είναι η θερμοκρασία του αέρα κοντά στο έδαφος και  $\epsilon$  είναι ο συντελεστής εκπομπής μεγάλων μηκών κύματος της ατμόσφαιρας. Για την εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής της ατμόσφαιρας έχουν διαμορφωθεί ημιεμπειρικές σχέσεις που στηρίζονται σε μετρήσεις που προέκυψαν από διάφορα πειράματα και διακρίνονται γενικά σε δύο ευρύτερες κατηγορίες: αυτές που αναφέρονται σε αίθριο ουρανό κι αυτές που την εκτιμούν υπό νεφοσκεπή ουρανό.

Ένα μεγάλο πλήθος εξισώσεων έχει προταθεί στην προσπάθεια υπολογισμού της ατμοσφαιρικής ακτινοβολίας υπό αίθριο ουρανό, από μετρούμενες στο έδαφος απλές μετεωρολογικές παραμέτρους. Στις περισσότερες, ο συντελεστής εκπομπής της ατμόσφαιρας υπό αίθριο ουρανό ( $\epsilon$ ) είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας ή της υγρασίας (της τάσης των ατμών ή του σημείου δρόσου) ή και των δύο. Οι πλέον χαρακτηριστικές εκφράσεις του  $\epsilon$  που αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία φαίνονται στον Πίνακα 2. Ανάμεσα σ'αυτές, η εξίσωση που πρότεινε το 1932 ο Brunt για να περιγράψει τον συντελεστή εκπομπής της ατμόσφαιρας ( $\epsilon$ ) συναρτήσει της τάσης των ατμών ( $e$ ) στο ύψος του κλωβού αποτέλεσε σταθμό και χρησιμοποιήθηκε ευρύτατα. Οι συντελεστές της σχετικής εξίσωσης που αναφέρονται στον Πίνακα 2 αποτελούν τη μέση τιμή 22 πειραμάτων που έγιναν σε διάφορες περιοχές της γης.

**Πίνακας 2** Σχέσεις για την εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής της ατμόσφαιρας ( $T_a$ =θερμοκρασία αέρα,  $T_d$ =θερμοκρασία δρόσου,  $e$ =τάση ατμών,  $n$ =νέφωση)

Προτείνων Ερευνητής	Σχέση	Σταθερές
Brunt (1932)	$\epsilon = a + b e^{1/2}$	$\alpha=0.605$ $\beta=0.048$
Swinbank (1963)	$\epsilon = b \cdot T_a^2$	$b = 0.92 \cdot 10^5$ ( $T_a$ σε $^{\circ}K$ )
Idso – Jackson(1969)	$\epsilon = 1 - a \exp(-b(273 - T_a)^2)$	$\alpha = 0.26$ , $b = 7.77 \cdot 10^{-4}$ ( $T_a$ σε $^{\circ}K$ ).
Brutsaert (1975)	$\epsilon = b (e / T_a)^{1/7}$	$b = 1.24$ ( $T_a$ σε $^{\circ}K$ )
Clark - Allen (1978)	$\epsilon = a + b \ln (T_d / 273)$	$a = 0.787$ και $b = 0.764$ ( $T_d$ σε $^{\circ}K$ ).
Idso 1 (1981)	$\epsilon = b e^{1/7} \exp (350 / T_a)$	$b = 0.179$ ( $T_a$ σε $^{\circ}K$ , $e$ σε hPa)
Idso 2 (1981)	$\epsilon = a + b e \exp (1500 / T_a)$	$a = 0.70$ , $b = 5.95 \cdot 10^5$ ( $T_a$ σε $^{\circ}K$ , $e$ σε hPa)
Berdahl and Martin (1984)	$\epsilon = a + b (T_d / 100) + c (T_d / 100)^2$	$a = 0.711$ , $b = 0.56$ , $c = 0.73$ ( $T_d$ σε $^{\circ}C$ )
Brunt (νεφοσκεπής ουρανός)	$\epsilon_{\text{νεφ}} = (a + b e^{1/2}) (1 + kn)$	$n$ , η νέφωση σε δέκατα. το $k$ εξαρτάται από το είδος των νεφών

Αξίζει να αναφερθεί ότι οι περισσότερες εξισώσεις χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της νυχτερινής ατμοσφαιρικής ακτινοβολίας και μόνο η εξίσωση των Berdahl και Martin αναφέρεται σε μέσες τιμές εικοσιτετραώρου. Επιπρόσθετα πρέπει να τονιστεί, ότι για την εκτίμηση της  $I_{\downarrow}$  από τις προαναφερθείσες σχέσεις, χρησιμοποιείται η  $T_a$  και η παράμετρος υγρασίας ( $e$  ή  $T_d$ ) κοντά στην επιφάνεια της γης. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η υπέρυθη ακτινοβολία απορροφάται έντονα από την ατμόσφαιρα και άρα αυτή που υπολογίζεται ή μετριέται προέρχεται κυρίως από τα στρώματα της ατμόσφαιρας που είναι σχετικά κοντά μεταξύ τους.

Για τον υπολογισμό της ατμοσφαιρικής ακτινοβολίας υπό νεφοσκεπή ουρανό  $(I_{\downarrow})_{\text{νεφ}}$  πρέπει να υπεισέρχεται εκτός από την ατμοσφαιρική ακτινοβολία υπό αίθριο ουρανό  $(I_{\downarrow})$  και η νέφωση για να συνυπολογιστεί και η εκπομπή από τα νέφη. Έχουν κατά καιρούς προταθεί αρκετές εξισώσεις και οι περισσότερες μπορούν να περιγραφούν με την ακόλουθη γενική μορφή:

$$(I_{\downarrow})_{\text{νεφ}} = I_{\downarrow} (1 + kn^c) \quad (3)$$

όπου  $n$  είναι το ποσοστό της νέφωσης και  $c$  μια εμπειρική σταθερά. Στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται τιμές του  $c$ , που κυμαίνονται από 1.0 έως 2.7 με μια μέση τιμή κοντά στο 2.0. Ο συντελεστής  $k$  είναι σταθερά που εξαρτάται από το είδος των νεφών. Στον Πίνακα 2.2 αναφέρεται ενδεικτικά ο συντελεστής εκπομπής υπό νεφοσκεπή ουρανό που δόθηκε από τον Brunt.

## 2. Το Φαινόμενο του θερμοκηπίου

### 2.1 Γενικά

Η ηλιακή ενέργεια υπό τη μορφή της ορατής και της υπεριώδους ακτινοβολίας, απορροφάται μερικώς από την ατμόσφαιρα και την επιφάνεια της γης και μερικώς ανακλάται από την ατμόσφαιρα και την επιφάνεια της γης. Η ενέργεια που απορροφάται από την επιφάνεια της γης, εκπέμπεται ξανά πίσω στην ατμόσφαιρα υπό μορφή ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος και αν και τα ατμοσφαιρικά αέρια (κυρίως οι υδρατμοί, το διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο, το υποξείδιο του αζώτου και το όζον) είναι σχεδόν διαφανή στην εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος, παγιδεύουν (μέσω της απορρόφησης) την εξερχόμενη γήινη ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της κινητικής ενέργειας των μορίων των αερίων προκαλώντας τελικά αύξηση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας (και επομένως και της επιφάνειας της γης). Η μεγαλύτερη απορρόφηση της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος λαμβάνει χώρα στην κατώτερη ατμόσφαιρα (τροπόσφαιρα).

Αυτό το φαινόμενο της θέρμανσης είναι γνωστό σαν «φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου» και η ονομασία οφείλεται στο γεγονός ότι οι ίδιες περίπου διαδικασίες διατηρούν υψηλές θερμοκρασίες σε ένα τεχνητό-αγροτικό θερμοκήπιο με γυάλινο κάλυμμα (Σχήμα ). Το γυάλινο αυτό κάλυμμα έχει τη δυνατότητα αφενός να είναι διαφανές στην ηλιακή ακτινοβολία και αφετέρου να είναι ημιδιαφανές στη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία (θερμική) που εκπέμπεται από το έδαφος-δάπεδο και τα φυτά του θερμοκηπίου. Οι σχετικά υψηλές τιμές της θερμοκρασίας μέσα στο θερμοκήπιο οφείλονται και στο ότι το γυάλινο κάλυμμα παρεμποδίζει την προς τα πάνω μετακίνηση του θερμού αέρα αλλά και από τις ειδικές συνθήκες υγρασίας-αερισμού που επικρατούν μέσα σε αυτό.

Στο Σχήμα δίνεται η αρχή λειτουργίας του φυσικού θερμοκηπίου με το στρώμα των αερίων του θερμοκηπίου να παίζει το ρόλο του γυάλινου καλύμματος στην παγίδευση της θερμικής ακτινοβολίας μεταξύ του στρώματος των αερίων και της επιφάνειας της γης.

Μέσω της λευκαύγειας  $\alpha$  που δίνει το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται από μια επιφάνεια (στην περίπτωση εδώ ανακλάται από το σύστημα Γη-Ατμόσφαιρα) πίσω στο διάστημα, τότε το σύστημα απορροφά από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ποσοστό ίσο με  $(1-\alpha)$ . Για συνθήκες θερμικής ισορροπίας (σταθερή θερμοκρασία του πλανήτη), η ηλιακή ενέργεια που απορροφάται από το σύστημα Γη-Ατμόσφαιρα θα πρέπει να είναι ίση με την ενέργεια που εκπέμπει «μέλαν σώμα» στην ίδια θερμοκρασία, δηλαδή:

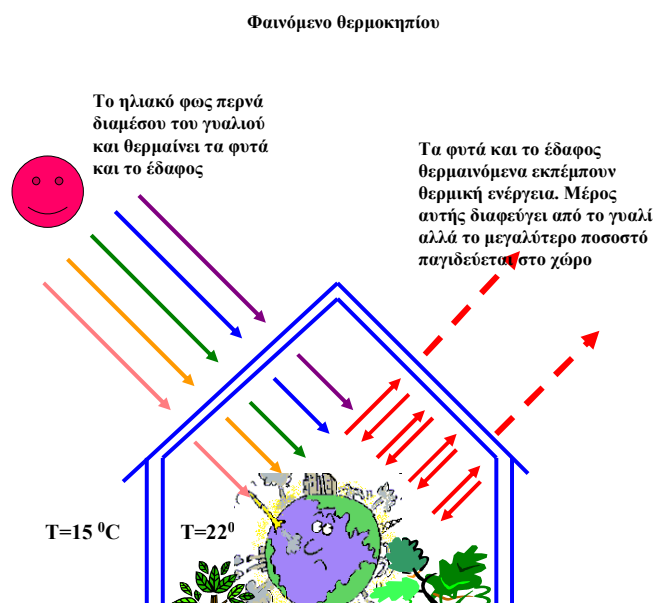
$$\pi R_{\gamma}^2(1-\alpha)R_0=4\pi R_{\gamma}^2\sigma T_e^4 \quad (4)$$

όπου  $T_e$  είναι η λεγόμενη ενεργός θερμοκρασία της γης και  $\sigma$  η σταθερά των Stefan-Boltzmann και  $R_{\gamma}$  η ακτίνα της γης. Από τη σχέση αυτή προκύπτει:

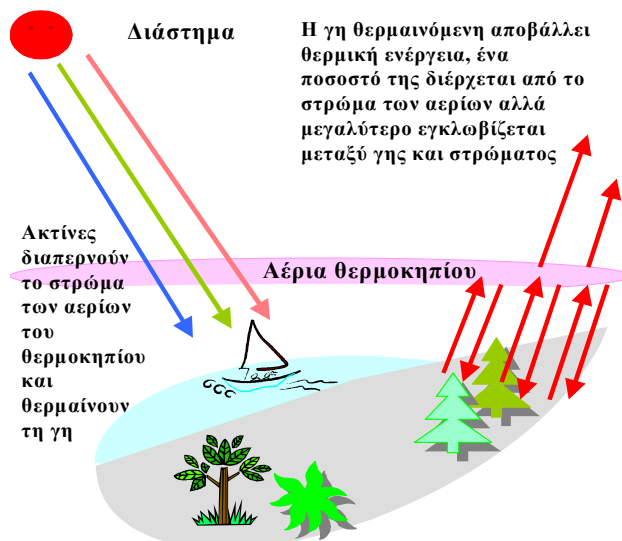
$$T_e=[(1-\alpha)R_0/4\sigma]^{1/4} \quad (5)$$

Δηλαδή η ενεργός θερμοκρασία της γης εξαρτάται από τη μέση απόσταση γης-ηλίου και από τη λευκαύγεια του πλανήτη. Θέτοντας στην εξίσωση αυτή  $R_0=1367 \text{ Wm}^{-2}$  (ηλιακή ακτινοβολία στο όριο της ατμόσφαιρας-ηλιακή σταθερά), και  $\alpha=0.33$  (μέση πλανητική τιμή για τη λευκαύγεια) προκύπτει ότι  $T_e=250 \text{ }^{\circ}\text{K}$ , δηλαδή αν δεν υπήρχε η ατμόσφαιρα η θερμοκρασία της γης θα ήταν ίση με  $-23 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Το γεγονός αυτό αποκαλύπτει τη συμβολή της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος που εκπέμπει η ίδια η ατμόσφαιρα στο σύστημα γης-ατμόσφαιρα. Επίσης, από μετρήσεις είναι γνωστό ότι η μέση θερμοκρασία της επιφάνειας της γης είναι περίπου  $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$  και της γήινης ατμόσφαιρας (τροπόσφαιρας) περίπου  $-60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Η διαφορά αυτή που παρατηρείται ανάμεσα στη θερμοκρασία της επιφάνειας της γης και της κατώτερης ατμόσφαιρας από την ενεργό θερμοκρασία της γης ( $-23 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) οφείλεται, από τη μια στη μάζα της ατμόσφαιρας και από την άλλη στην ικανότητα των συστατικών της να απορροφούν κύρια στην υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος εκπομπής της γης.

Εκτιμάται ότι σήμερα ο άνθρωπος με τις δραστηριότητές του συμβάλλει σημαντικά στην ενίσχυση του φυσικού φαινομένου του θερμοκηπίου μέσω της ενεργοποίησης των εκπομπών των λεγομένων αερίων του θερμοκηπίου.



Σχήμα 4. Αρχή λειτουργίας του τεχνητού θερμοκηπίου



Σχήμα 5. Αρχή του Φαινομένου του Θερμοκηπίου-Αέρια Θερμοκηπίου.

## 2.2 Δυναμικοί παράγοντες που επηρεάζουν την συμπεριφορά των αερίων του θερμοκηπίου

Στο κλιματικό σύστημα της Γης-Ατμόσφαιρας, υπάρχουν διάφοροι δυναμικοί παράγοντες που επηρεάζουν αλλά και διέπουν τη συμπεριφορά των διαφόρων αερίων του θερμοκηπίου.

**Πρώτον:** η ισχύς της απορρόφησης και τα μήκη κύματος στα οποία απορροφούν τα επιμέρους αέρια την θερμική-υπέρυθρη ακτινοβολία είναι βασικής σημασίας στον καθορισμό του πότε ένα μόριο του συγκεκριμένου αερίου, αποτελεί καθοριστικό και σημαντικό παράγοντα στη δυναμική του θερμοκηπίου. Αυτός ο παράγοντας τροποποιείται από τις τυχόν επικαλύψεις των διαφόρων φασματικών περιοχών απορρόφησης από τις επιμέρους φασματικές ζώνες απορρόφησης άλλων υπαρχόντων αερίων στην ατμόσφαιρα. Για παράδειγμα, οι φυσιολογικές ποσότητες του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα είναι σημαντικά μεγάλες (σε σύγκριση με άλλα αέρια συστατικά της ατμόσφαιρας) ώστε η ατμόσφαιρα να είναι σημαντικά αδιαφανής για μια μικρή περιοχή μηκών κύματος γύρω από το μέγιστο της φασματικής απορρόφησης, που στην περίπτωση του CO<sub>2</sub> είναι τα 15 μm. Η πρόσθετη ποσότητα μικρού ποσοστού αερίου ικανού για απορρόφηση στο συγκεκριμένο αυτό μήκος κύματος θα έχει ασήμαντο αποτέλεσμα στη ροή ακτινοβολίας στην τροπόπαυση. Η ύπαρξη άλλων αερίων του θερμοκηπίου με φασματική απορρόφηση σε σχεδόν διαφανείς περιοχές της υπέρυθρης ακτινοβολίας, ιδιαίτερα μεταξύ 10 και 12 μm (βλέπε ατμοσφαιρικό



παράθυρο), θα έχουν πολύ σημαντικότερο ρόλο στη δυναμική της διάδοσης της θερμικής ακτινοβολίας.

**Δεύτερον:** ο χρόνος ζωής ή ο χρόνος παραμονής στην ατμόσφαιρα ενός αερίου του θερμοκηπίου θα επηρεάζει σημαντικά το δυναμικό του ρόλο ως προς τη θερμική ενέργεια. Αέρια τα οποία παραμένουν στην ατμόσφαιρα για σημαντικό χρονικό διάστημα, προτού μετακινηθούν ή καταστραφούν μέσω των μηχανισμών της καταβόθρας, θα εμφανίζουν πολύ σημαντικότερο δυναμικό ρόλο σε μεγαλύτερο χρονικό ορίζοντα.

**Τρίτον:** οι υπάρχουσες ποσότητες στην ατμόσφαιρα ενός αερίου του θερμοκηπίου δυνατόν να υπαγορεύουν τις επιπτώσεις που πιθανόν πρόσθετα μόρια του αερίου αυτού θα μπορούσαν να επιφέρουν. Για αέρια όπως τα αλογονίδια, που οι φυσικές συγκεντρώσεις τους είναι από μηδενικές έως πολύ μικρές, η δυναμική τους πλησιάζει τη γραμμική συσχέτιση, τουλάχιστον για τα σημερινά δεδομένα των συγκεντρώσεών τους. Επίσης, για αέρια όπως το μεθάνιο και το υποξείδιο του αζώτου που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα σε ανάλογες ποσότητες ώστε να ενεργοποιείται σημαντική απορρόφηση, βρέθηκε ότι ο δυναμικός τους ρόλος προσεγγιστικά είναι ανάλογος της τετραγωνικής ρίζας των συγκεντρώσεών των ( $\approx\sqrt{C}$ ). Για το διοξείδιο του άνθρακα, σημαντικά μέρη του φάσματος απορρόφησης είναι τόσο αδιαφανή (βλέπε και Σχήμα ), ώστε επιπλέον μόρια στην ατμόσφαιρα δεν θα έχουν πρόσθετη σημαντική επίπτωση. Στην περίπτωση του  $\text{CO}_2$  ο δυναμικός ρόλος του βρέθηκε να είναι ανάλογος του λογαρίθμου της συγκέντρωσής του.

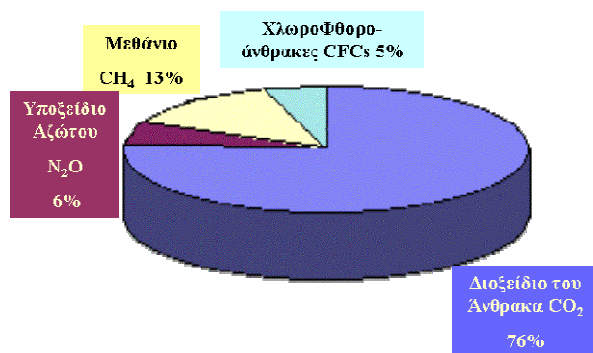
Εκτός από τα άμεσα αποτελέσματα, πολλά αέρια του θερμοκηπίου εμφανίζουν και έμμεσα δυναμικό ρόλο στη κλιματική κατάσταση της θερμικής ακτινοβολίας μέσω των αλληλεπιδράσεων τους με άλλες ατμοσφαιρικές διεργασίες. Για παράδειγμα, η οξειδωση του μεθανίου στην ατμόσφαιρα οδηγεί σε πρόσθετες ποσότητες  $\text{CO}_2$  στην ατμόσφαιρα. Επίσης, οι CFCs επηρεάζουν σημαντικά την κατανομή του όζοντος στην ατμόσφαιρα, που και αυτό σε τελευταία ανάλυση είναι αέριο του θερμοκηπίου. Η ρίζα ( $\text{OH}^{-1}$ ) δεν αποτελεί αέριο του θερμοκηπίου, όμως είναι εξόχως σημαντική η παρουσία του στην τροπόσφαιρα, σαν χημικός καθαριστής.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω σχετικά με τα αέρια του θερμοκηπίου και τη συμβολή τους στο ανθρωπογενές φαινόμενο του θερμοκηπίου στο Σχήμα δίνονται τα ποσοστά των διαφόρων αερίων που συμβάλλουν σημαντικά στο φαινόμενο αυτό και κατ' επέκταση στη θέρμανση γενικά του πλανήτη μας.

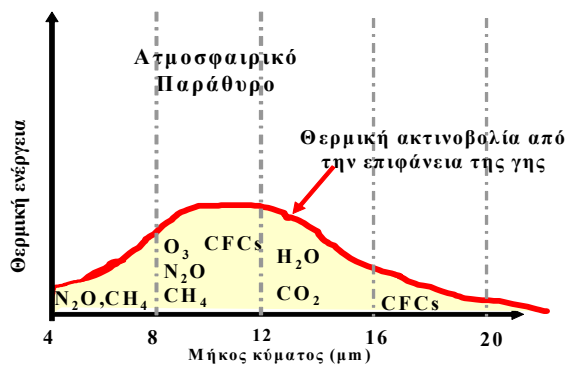
Η ολική αύξηση της θερμικής ενέργειας, λόγω του άμεσου δυναμικού ρόλου των αερίων του θερμοκηπίου, είναι περίπου  $2.5 \text{ Wm}^{-2}$ . Συγκρινόμενη η τιμή αυτή με την ηλιακή σταθερά ( $=1367 \text{ Wm}^{-2}$ ) θα μπορούσε να πει κάποιος ότι σχεδόν είναι ασήμαντη η επίπτωση της δράσης των αερίων του θερμοκηπίου. Εάν όμως λάβουμε υπόψη τη μέση τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στο όριο της τροπόσφαιρας ( $=270 \text{ Wm}^{-2}$ ), η οποία είναι χαμηλή σε σχέση με την ηλιακή σταθερά λόγω του ότι είναι συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους και του χρόνου, τότε αντιλαμβάνεται κάποιος καθαρά τη συμβολή των αερίων στη θέρμανση του συστήματος Γης-Ατμόσφαιρας.

Συμπληρωματικά με το Σχήμα , στο Σχήμα δίνεται η θερμική ενέργεια που εκπέμπει η επιφάνεια της γης συναρτήσει του μήκους κύματος καθώς και τα διάφορα αέρια του θερμοκηπίου που συμβάλλουν στη μορφοποίηση τόσο του φυσικού όσο και του ανθρωπογενούς φαινομένου του θερμοκηπίου.

### Αέρια Θερμοκηπίου



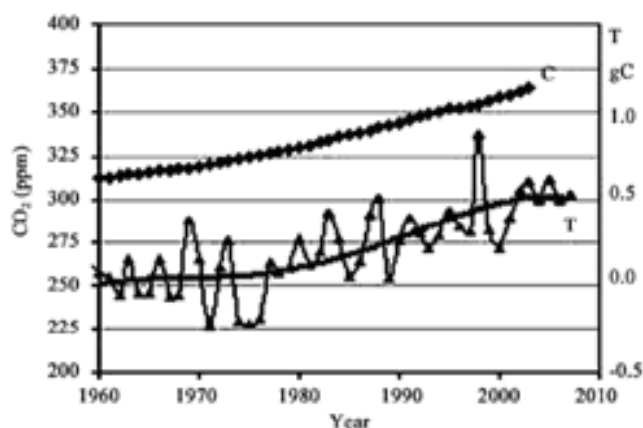
Σχήμα 6. Συμβολή διαφόρων αερίων στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.



Σχήμα 7. Θερμική ενέργεια και απορρόφηση από τα αέρια.

## 2.3 Το Διοξείδιο του Άνθρακα (CO<sub>2</sub>)

Οι συγκεντρώσεις του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα της γης είναι περίπου 390 ppm (parts per million) το 2010 (αύξηση κατά 1.9 ppm/yr during 2000–2009) και είναι οι υψηλότερες εδώ και 800 χρόνια και οι υψηλότερες από ότι 20 εκατομμύρια χρόνια. Στο Σχήμα δίνεται η συγκέντρωση του ρύπου από το 1960 ως το 2008 σε ένα σταθμό στη Χαβάη (Mauna Loa) και η αντίστοιχη θερμοκρασία αέρα. Παρατηρείται η σταδιακή αύξηση των συγκεντρώσεων του ρύπου και της θερμοκρασίας και πιστεύεται ότι οι δύο τάσεις συνδέονται, δηλαδή ότι η αύξηση των επιπέδων του ρύπου συμβάλει στην κλιματική αλλαγή. Πρέπει να αναφερθεί ότι αντίθετα, υπάρχει και η επιστημονική άποψη ότι η αύξηση του ρύπου δεν συμβάλει στην κλιματική αλλαγή.



Σχήμα 8. Η συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> από το 1960 ως το 2008 σε ένα σταθμό στη Χαβάη (Mauna Loa) και η αντίστοιχη θερμοκρασία αέρα.

## 2.4 Επίδραση σκόνης στην ακτινοβολία

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η επίδραση που έχουν τα αιωρούμενα σωματίδια στο ισοζύγιο ακτινοβολιών στην ατμόσφαιρα και στο έδαφος. Ως αιωρούμενα σωματίδια (Particulate Matter, PM) χαρακτηρίζεται κάθε σώμα, στερεό ή υγρό (εκτός του νερού) που βρίσκεται σε διασπορά και έχει διάμετρο μεγαλύτερη από 0.0002 μm και μικρότερη από 500 μm περίπου. Η σκόνη, ο καπνός, η ιπτάμενη τέφρα αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα αιωρούμενων σωματιδίων. Τα PM ποικίλουν ανάλογα με το μέγεθος, τη σύσταση και την προέλευσή τους και κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την αεροδυναμική τους διάμετρο. Αιωρούμενα σωματίδια διαμέτρου μεταξύ 2.5-10.0 μm, χαρακτηρίζονται ως *χονδρόκοκκα σωματίδια*, PM10 ("coarse" particles). Τα σωματίδια αυτά έχουν διάφορες πηγές προέλευσης, όπως σκόνη μεταφερόμενη με τον άνεμο, από οχήματα τα οποία κινούνται σε άστρωτους δρόμους, από μηχανήματα βιομηχανιών συμπιέσεως, λιωσίματος και τροχισμού διαφόρων υλικών, κ.ά. Αιωρούμενα σωματίδια διαμέτρου μικρότερης των 2.5 μm αναφέρονται ως *λεπτόκοκκα σωματίδια*, PM 2.5 ("fine" particles) και προκύπτουν από πολλές, διαφορετικές πηγές, όπως από τα καυσαέρια των αυτοκινήτων, από διάφορες βιομηχανικές εγκαταστάσεις καθώς και απευθείας από φυσικές πηγές. Κύρια πηγή των αιωρούμενων σωματιδίων φυσικής προέλευσης αποτελούν οι ερημικές εκτάσεις του πλανήτη, με πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα την έρημο Σαχάρα, η οποία αποτελεί και την σημαντικότερη πηγή σκόνης παγκοσμίως.

Τα αιωρούμενα σωματίδια σκεδάζουν και απορροφούν μέρος της ηλιακής αλλά και της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Με αυτό τον τρόπο επηρεάζουν την ίδια τη δυναμική της ατμόσφαιρας, αλλά και διάφορες παραμέτρους όπως την εξάτμιση, το φαινόμενο του θερμοκηπίου και την ευστάθεια. Αυτή είναι και η λεγόμενη άμεση επίδραση των

σωματιδίων (direct effect). Μέρος της ακτινοβολίας που απορροφάται, επανεκπέμπεται στα μεγάλα μήκη κύματος θερμαίνοντας έτσι την ατμόσφαιρα στο ύψος της σκόνης και στο έδαφος, μεταβάλλοντας την κατακόρυφη δομή και την ευστάθεια της ατμόσφαιρας. Το μέγεθος της άμεσης επίδρασης είναι αβέβαιο και εξαρτάται από τις οπτικές ιδιότητες της σκόνης (οι οποίες μεταβάλλονται συναρτήσει του μήκους κύματος), τη χωρική και χρονική κατανομή των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, τη νεφοκάλυψη και τη λευκαύγεια της επιφάνειας. Σε αντίθεση με τα αέρια του θερμοκηπίου ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , κ.τ.λ.), τα οποία επηρεάζουν μόνο την εξερχόμενη, υπέρυθρη ακτινοβολία, τα σωματίδια σκόνης επιδρούν και στις δύο “πλευρές” του ενεργειακού φάσματος, σκεδάζοντας και απορροφώντας μικρού και μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία. Ιδιαίτερα ισχυρή είναι η σκέδαση στην ορατή περιοχή του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας (στέλνοντας έτσι ένα ποσοστό της πίσω στο διάστημα) ψύχοντας την επιφάνεια του πλανήτη. Αντιθέτως στο υπέρυθρο κυριαρχεί η απορρόφηση και επανεκπομπή και η σκόνη λειτουργεί ως αέριο θερμοκηπίου. Έτσι σε αντίθεση με τα θερμοκηπικά αέρια, τα ατμοσφαιρικά σωματίδια μπορούν να προκαλέσουν τόσο θέρμανση όσο και ψύξη της ατμόσφαιρας.

Ο κύκλος της σκόνης στην ατμόσφαιρα παρουσιάζει έντονη εποχιακή διακύμανση και συνδέεται άμεσα με την ευρύτερη ατμοσφαιρική κυκλοφορία. Αντίστοιχα οι μεταβολές στην ακτινοβολία ακολουθούν τη χωρική κατανομή των σωματιδίων φυσικής προέλευσης και παρουσιάζουν αντίστοιχη εποχιακή μεταβλητότητα. Λόγω επίδρασης σωματιδίων σκόνης, η μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία μειώνεται λόγω σκέδασης και απορρόφησης από τα σωματίδια σκόνης ενώ, στο υπέρυθρο παρατηρείται αύξηση της εισερχόμενης ακτινοβολίας καθώς η σκόνη εκπέμπει προς το έδαφος και προς την κορυφή της ατμόσφαιρας στο υπέρυθρο.