ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΗ ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΗΣ ΓΗΣ

ΠΑΡΙΑΝΟΣ ΑΥΓΟΥΣΤΙΝΟΣ
2004.05.0028
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2010

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 3

ΚΕΦ 2. ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ-ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ 5
Ήλιος και ηλιακή ενέργεια 5
Η Γη και η ατμόσφαιρά της 9
Σύσταση της γήινης ατμόσφαιρας 10
Η ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα 11
Η φύση και το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας 12
Θερμοκρασία 15

ΚΕΦ 3. ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ-ΘΕΩΡΙΑ 17
Σύντομη εισαγωγή σε απλά κλιματικά μοντέλα 17
Κλίμα και κλιματικό σύστημα 17
Κλιματική Αλλαγή 18
Φαινόμενο του θερμοκηπίου 20
Η θεωρία των ηλιακών κηλίδων 22

ΚΕΦ 4. ΜΟΝΤΕΛΟ 25
Περιγραφή μοντέλου 25
Πλαίσιο μοντέλου κλιματικών αλλαγών 25

ΚΕΦ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 35

ΚΕΦ 6. ΑΝΑΦΟΡΕΣ 39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία, με τίτλο «*Μελέτη της επίδρασης της μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας στη μέση θερμοκρασία της Γης*», εκπονήθηκε από το Νοέμβριο του 2009, εώς τον Αύγουστο του 2010 στα Χανιά, στο τμήμα *Μηχανικών Περιβάλλοντος* του *Πολυτεχνείου Κρήτης*, υπό την επίβλεψη του καθηγητή *Β.Γκέκα*, με τη βοήθεια του Γ. Μανιάτη.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου για την παρατήρηση της επιρροής των εναλλαγών της ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας (solar irradiance), στη μέση θερμοκρασία του πλανήτη Γη, καθώς και της επίδρασης του διοξειδίου του άνθρακα σε αυτή και τη σύγκριση των δύο αυτών μεγεθών.

Στο 2ο κεφάλαιο, γίνεται μια συνοπτική περιγραφή του πλανήτη Ηλίου και της ενέργειάς του, και τον τρόπο με τον οποίο αυτή μεταδίδεται στη Γη. Επίσης γίνεται παρουσιάση των ιδιοτήτων της ατμόσφαιρας και της σύστασής της, των ιδιοτήτων της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, καθώς και θεωρητική προσέγγιση της έννοιας της θερμοκρασίας και πως αυτή επιδρά με το γήινο περιβάλλον.

Στο 3ο κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη εισαγωγή στα κλιματικά μοντέλα, τα είδη και τον τρόπο προσέγγισής τους, και στο κλιματικό σύστημα. Επίσης γίνεται αναφορά στην κλιματική μεταβολή και στις πιθανές αιτίες, ενώ παρουσιάζονται συνοπτικά το φαινόμενο του θερμοκηπίου και η θεωρία των ηλιακών κηλίδων. Αυτά τα δύο φαινόμενα κατά κάποιον τρόπο θα συγκριθούν στο επόμενο κεφάλαιο στο μοντέλο μας.

Στο 4ο κεφάλαιο αναλύεται το μοντέλο μας, παρουσιάζονται οι εξισώσεις και ο τρόπος με τον οποίον φτάσαμε στην τελική μας εξίσωση, σύμφωνα με το νόμο του Stefan Boltzmann. Ακολουθεί η πρώτη προσέγγιση του Μοντέλου με πραγματικές κανονικοποιημένες τιμές της ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας, και το διάγραμμα των αποτελεσμάτων. Έπειτα στο δεύτερο και τελικό στάδιο παρουσιάζονται τα δύο διαγράμματα των αποτελεσμάτων της πρώτης φάσης, δηλαδή της μεταβολής της ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας με μη κανονικοποιημένες τιμές κατα τη διάρκεια ενός χρόνου, και της δεύτερης φάσης, δηλαδή της μεταβολής που προκαλεί το CO_2 στην απορροφητικότητα της ατμόσφαιρας στο υπέρυθρο.

Στο 5^{ο} κεφάλαιο, αναλύονται τα αποτελέσματα του μοντέλου και εξηγείται ο τρόπος με τον οποίον θέλουμε να συμβάλει αυτή η εργασία στη γενικότερη μελέτη του κλίματος και της κλιματικής αλλαγής. Επίσης γίνεται μια απόπειρα

για πρόβλεψη σε σχέση με τη μέση θερμοκρασία της Γης και παρουσιάζονται και δύο διαγράμματα που συνδέουν την ηλιακή δραστηριότητα με τη θερμοκρασία.

Στο 6ο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εργασία και οι αναφορές.

Συνολικά η εργασία φιλοδοξεί να συμβάλει στη μελέτη του κλίματος και των μεταβολών του, παρατηρώντας τις μεταβολές μεγεθών και δεδομένων, όπως είναι η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας, που μέχρι τώρα θεωρούνταν ως σταθερά. Δεν έχει σκοπό να αμφισβητήσει τις ήδη υπάρχουσες θεωρίες καθώς και τις μελέτες που έχουν γίνει σε άλλα κλιματικά μοντέλα, απλά γίνεται μια προσπάθεια να εισαχθούν νέα δεδομένα για καλύτερα και πιο συνολικά αποτελέσματα στις μελέτες που θα διεξαχθούν στο μέλλον.

Ευχαριστώ τον καθηγητή μου Β. Γκέκα για την πολύτιμη βοήθειά του και κυρίως για τις πολύτιμες ιδέες του, καθώς και για τον προσωπικό χρόνο και κόστος που αφιέρωσε για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας. Επίσης ευχαριστώ το Γ. Μανιάτη και τον Α. Πλουμή για την πολύτιμη βοήθειά τους.

Η εργασία είναι αφιερωμένη στην οικογένειά μου, στους φίλους μου και στην Ενωτική Πρωτοβουλία. Ευχαριστώ όλους για την έμπνευση, τη στήριξη και την υπομονή τους. Επίσης την αφιερώνω στη μνήμη του Λ. Φούντα.

Παριανός Αυγουστίνος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΗΛΙΟΣ ΚΑΙ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Ο ήλιος αποτελεί ως γνωστόν την κύρια πηγή ενέργειας στον πλανήτη μας. Η ενέργεια που προέρχεται από τον ήλιο, και ονομάζεται ηλιακή ενέργεια, φτάνει στη Γη με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, αφού υποστεί σημαντικές αλληλεπιδράσεις με την ατμόσφαιρα. Η ενέργεια ακτινοβολίας που εκπέμπεται ή αντανακλάται από τα συστατικά της ατμόσφαιρας, αποτελεί την ατμοσφαιρική ακτινοβολία.

Ο Ήλιος είναι σχεδόν σφαιρικό σώμα με διάμετρο D = $1,39*10^9$ m και μάζα m = $2*10^{30}$kg, το οποίο βρίσκεται σε μέση απόσταση L = $1,50*10^{11}$ m από τη Γη. Εκπέμπει διαρκώς ενέργεια ακτινοβολίας E_{sun} = $3,8*10^{26}$ W. Λιγότερο από το ένα δισεκατομμυριοστό αυτής της ενέργειας (περίπου $1,7*10^{17}$ W) προσπίπτει στη Γη.

Η ενέργεια από τον Ήλιο οφείλεται στη συνεχή αντίδραση σύντηξης, κατά τη διάρκεια της οποίας 2 άτομα υδρογόνου συγχωνεύονται για να σχηματίσουν ένα άτομο ηλίου. Επομένως ο Ήλιος αποτελεί ουσιαστικά έναν πυρηνικό αντιδραστήρα, με θερμοκρασίες μέχρι και 40.000 K στον πυρήνα. Ηθερμοκρασία πέφτει περίπου στους 6.000 K στην εξωτερική περιοχή του Ηλίου, που ονομάζεται ζώνη μεταγωγής θερμότητας, λόγω της κατανάλωσης της ενέργειας από την ακτινοβολία.

Η ηλιακή ενέργεια που φτάνει στην ατμόσφαιρατης Γης, προσδιορίστηκε από μία σειρά μετρήσεων, που διεξάχθηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1960 με τη χρήση αεροσκαφών σε μεγάλο ύψος, αερόστατων και διαστημοπλοίων και υπολογίστηκε περίπου ίση με 1.360 W/m^2. Η ποσότητα αυτή συνηθίζεται να ονομάζεται «ηλιακή σταθερα».

Η «ηλιακή σταθερά» παριστάνει το ρυθμό με τον οποίο η ηλιακή ενέργεια προσπίπτει σε μια επιφάνεια κάθετη στις ηλιακές ακτίνες στ εξωτερικό άκρο της ατμόσφαιρας, όταν η Γη βρίσκεται στη μέση απόστασή της από τον ήλιο. Λόγω της φύσης της , η ηλιακή σταθερά μπορεί να αντιμετωπιστεί και σαν flux κατά τη μεταφορορά θερμότητας στο σύστημα Ηλιος-Γη όπως θα οριστεί παρακάτω.

Λόγω της ελλειπτικής τροχιάς της Γης, η απόσταση μεταξύ του Ήλιου και της Γης και άρα η πραγματική τιμή της ηλιακής σταθεράς, μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους.

Μεταβάλλεται από ένα μέγιστο 1413 W/m^2 στις 21 Δεκεμβρίου, μέχρι ένα ελάχιστο 1321 W/m^2 στις 21 Ιουνίου. (Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι το βόρειο ημισφαίριο της Γης είναι ακόμη πιο μακριά από τον Ήλιο το καλοκαίρι.) Ωστόσο, αυτή η μεταβολή παραμένει μέσα στα πλαίσια του ±3,4% της μέσης

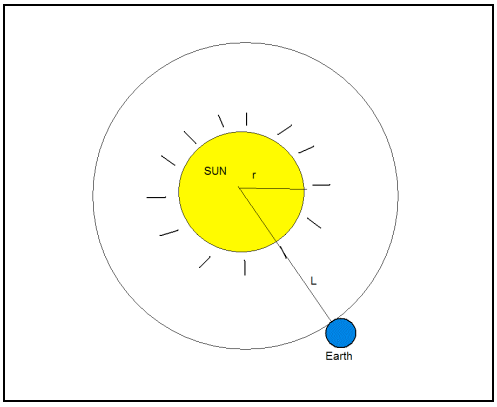
τιμής, και θεωρείται αμελητέα για πρακτικούς λόγους, και συνηθίζεται η «ηλιακή σταθερά» (G_s) να θεωρείται σταθερή!

ΙΣΧΥΕΙ: $$4\cdot \pi\cdot L^2\cdot G_s = 4\cdot \pi\cdot r^2\cdot \sigma\cdot T_{sun}^{\ 4}$$

Όπου L: μέση απόσταση μεταξύ των κέντρων του Ηλίου και της Γης
r: ακτίνα Ηλίου

Η ισότητα ισχύει εφόσον η ηλιακή ενέργεια δεν υφίσταται εξασθένιση (ή ενίσχυση) καθώς διαπερνά το κενό

Το αριστερό σκέλος παριστάνει την ολική ηλιακή ενέργεια που διαπερνά μια σφαιρική επιφάνεια, της οποίας η ακτίνα είναι η μέση απόσταση Γης-Ηλίου.
Το δεξί σκέλος παριστάνει την ολική ηλιακή ενέργεια που απομακρύνεται από την εξωτερική επιφάνεια του Ηλίου.



Σχήμα 2.1: Ο Ήλιος και η Γη

Η ολική ηλιακή ενέργεια που διαπερνά ομόκεντρες σφαίρες παραμένει σταθερή, αλλά η ενέργεια που πέφτει ανά μονάδα εμβαδού μειώνεται με την αύξηση της ακτίνας.

Η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος, δείχνει ότι υφίσταται σημαντική εξασθένιση καθώς διαπερνά την ατμόσφαιρα, λόγω των φαινομένων της απορρόφησης και της σκέδασης. Περίπου το 99% της ατμόσφαιρας περιλαμβάνεται σε απόσταση 30 km από την επιφάνεια της Γης.

Τα πολλά βυθίσματα της φασματικής κατανομής της ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης, οφείλονται στην απορρόφησή της από τα αέρια οξυγόνο, όζον, διοξείδιο του άνθρακα και από υδρατμούς.

Ως αποτέλεσμα αυτών των απορροφήσεων, η ηλιακή ενέργεια που φτάνει στην επιφάνεια της Γης εξασθενεί σημαντικά, περίπου στα 950 W/m^2 μια «καθαρή» ημέρα, και πολύ λιγότερο τις ημέρες με συννεφιά ή νέφος.

Όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, όλη η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης, βρίσκεται στη ζώνη μήκους κύματος από 0,3 μέχρι 2,5 μm.

Ένας άλλος μηχανισμός που εξασθενεί την ηλιακή ακτινοβολία καθώς αυτή διαπερνά την ατμόσφαιρα, είναι το φαινόμενο της σκέδασης ή της ανάκλασης από τα μόρια του αέρα και τα πολλά άλλα είδη σωματιδίων όπως η σκόνη, το νέφος και τα σταγονίδια του νερού που αιωρούνατι στην ατμόσφαιρα.

Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει σε μια επιφάνεια στη Γη, θεωρείται ότι αποτελείται από ένα ευθύ τμήμα και από ένα τμήμα διάχυσης.
Το μέρος της ηλιακής ενέργειας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης χωρίς να διασκορπίζεται ή να απορροφάται από την ατμόσφαιρα, ονομάζεται άμεση ηλιακή ακτινοβολία G_D.

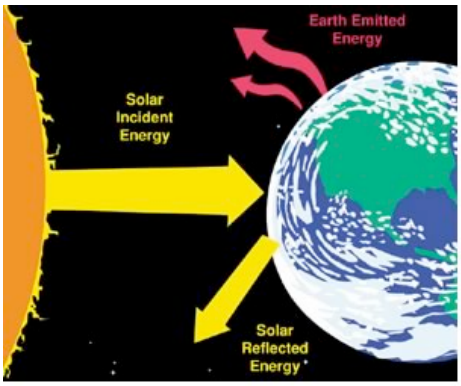
Η διασκορπισμένη ακτινοβολία θεωρείται ότι φτάνει στην επιφάνεια της Γης ομοιόμορφα, από όλες τις διευθύνσεις και ονομάζεται διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία G_d.

Τότε η ολική ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει σε μια μονάδα εμβαδού μιας οριζόντιας επιφάνειας που βρίσκεται στο έδαφος είναι:

$$\mathbf{G_{solar} = G_D * \cos\theta + G_d \quad (W/m^2)}$$

όπου θ: γωνία πρόσπτωσης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας

Η διάχυτη ακτινοβολία μεταβάλλεται από περίπου το 10% της ολικής ακτινοβολίας μια ηλιόλουστη μέρα, μέχρι περίπου το 100% μια εντελώς συννεφιασμένη μέρα.



Σχήμα 2.2: Αντανάκλαση και απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας

Αν και θα αναλυθεί παρακάτω, εδώ αξίζει να αναφερθεί ότι τα μόρια των αερίων αλλά και τα αιωρούμενα σωματίδια στην ατμόσφαιρα, εκπέμπουν ακτινοβολία, αλλά και την απορροφούν. Η ατμοσφαιρική εκπομπή οφείλεται κυρίως στα μόρια του CO_2 και του νερού και συγκεντρώνεται στις περιοχές μήκους κύματος μεταξύ 5 και 8 μm και πάνω από 13 μm. Παρόλο που αυτή η εκπομπή δε μοιάζει πολύ με την κατανομή της ακτινοβολίας από ένα μέλαν σώμα, είναι πολύ βολικό στους υπολογισμούς της ακτινοβολίας να θεωρείται η ατμόσφαιρα ως μέλαν σώμα σε ορισμένες χαμηλότερες υποθετικές θερμοκρασίες, το οποίο εκπέμπει ίση ποσότητα ενέργειας ακτινοβολίας.

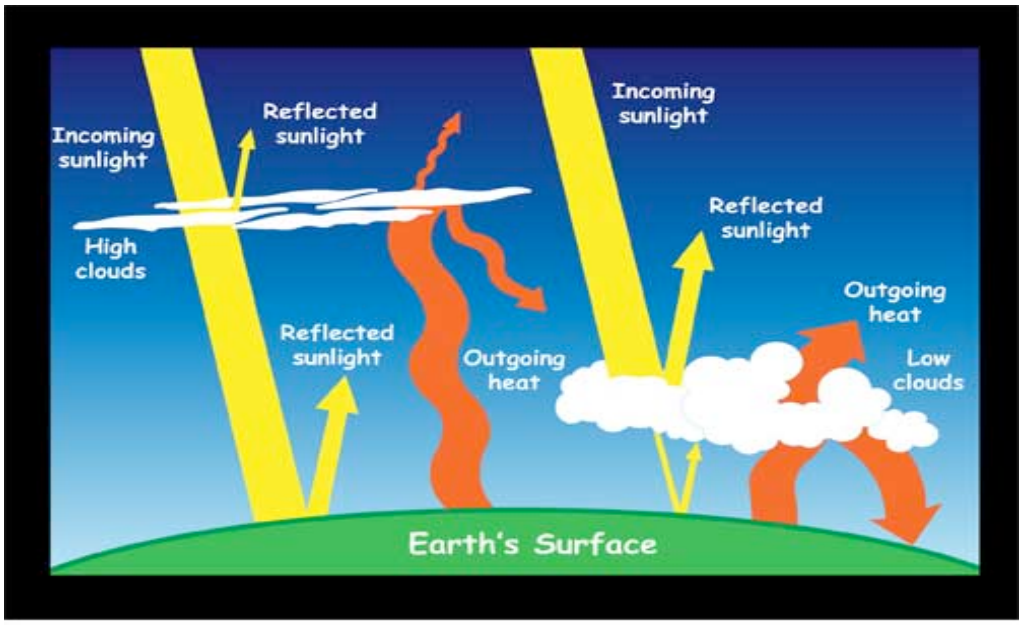
Αυτή η υποθετική θερμοκρασία ονομάζεται αποτελεσματική (ή ενεργός) θερμοκρασία ουρανού T_{sky}. Τότε η εκπομπή θερμοκρασίας από την ατμόσφαιρα προς την επιφάνεια της Γης εκφράζεται ως εξής:

$$\mathbf{G_{sky} = \sigma * T^4_{sky}\ (W/m^2)}$$

T_{sky}: Εξαρτάται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, κυμαίνεται από περίπου 230 K σε συνθήκες κρύου και καθαρού ουρανού, μέχρι περίπου 285 K σε ζεστό καιρό και συννεφιά.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αποτελεσματική θερμοκρασία του ουρανού δεν αποκλίνει ιδιαίτερα από τη θερμοκρασία δωματίου. Επομένως, με βάση το νόμο του Kirchoff, η απορροφητικότητα μιας επιφάνειας θεωρείται ίση με την ικανότητα εκπομπής σε θερμοκρασία δωματίου, α=ε. Τότε, η ακτινοβολία του ουρανού που απορροφάται από μια επιφάνεια μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\mathbf{E_{sky,absorbed} = \alpha * G_{sky} = \alpha * \sigma * T_{sky}^4 = \varepsilon * T_{sky}^4}$$



Σχήμα 2.3: Αντανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας ανάλογα με το είδος, το ύψος και το μέγεθος των συννέφων

Ο καθαρός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία σε μία επιφάνεια εκτεθειμένη στην ηλιακή και ατμοσφαιρική ακτινοβολία προσδιορίζεται από ισοζύγιο ενέργειας:

$$\begin{aligned} Q_{net,rad} &= \Sigma E_{absorbed} - \Sigma E_{emittos} \\ &= E_{solar,\ absorbed} + E_{sky,\ absorbed} - E_{emittos} \\ &= \alpha_s * G_{solar} + \varepsilon * \sigma * T_{sky}^4 - \varepsilon * \sigma * T_s^4 \\ &= \alpha_s * G_{solar} + \varepsilon * \sigma * (T_{sky}^4 - T_s^4) \end{aligned}$$

όπου: T_s = θερμοκρασία επιφάνειας σε K
ε = ικανότητα εκπομπής σε θερμοκρασία δωματίου

Θετική τιμή της $Q_{net,rad}$ δηλώνει κέρδος θερμότητας ακτινοβολίας από την επιφάνεια, ενώ η αρνητική δηλώνει απώλεια θερμότητας.

Η απορρόφηση και η εκπομπή της ακτινοβολίας από τα στοιχειώδη αέρια όπως το υδρογόνο, το οξυγόνο και το άζωτο σε μέτριες θερμοκρασίες είναι αμελητέες, και ένα μέσο γεμάτο από τα αέρια αυτά μπορεί να θεωρηθεί ως κενό στην ανάλυση της ακτινοβολίας. Ωστόσο, η απορρόφηση και η εκπομπή αερίων με μεγαλύτερα μόρια, όπως το νερό και το διοξείδιο του άνθρακα, μπορεί να είναι σημαντικές και ίσως θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν όταν το μέσο διαθέτει σημαντικές ποσότητες των αερίων αυτών.

Για παράδειγμα, ένα στρώμα υδρατμού πάχους 1 m, σε πίεση 1 atm και στους 100 ^{o}C εκπέμπει περισσότερο από το 50 % της ενέργειας που θα εξέπεμπε ένα μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία.

Σε εφαρμογές ηλιακής ενέργειας, η φασματική κατανομή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας είναι πολύ διαφορετική από τη φασματική κατανομή της ακτινοβολίας που εκπέμπουν οι επιφάνειες εφόσον η πρώτη συγκέντρωση είναι στην περιοχή μικρού μήκους κύματος και η δεύτερη στην υπέρυθρη περιοχή. Επομένως, οι ιδιότητες ακτινοβολίας των επιφανειών θα διαφέρουν σημαντικά για την προσπίπτουσα και εκπεμπόμενη ακτινοβολία, ενώ οι επιφάνειες θεωρούνται ότι έχουν δύο σύνολα ιδιοτήτων: ένα για την ηλιακή ακτινοβολία και ένα άλλο για την υπέρυθρη σε θερμοκρασία δωματίου.

Η ΓΗ ΚΑΙ Η ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΤΗΣ

Η Γη περιβάλεται από μία εκτεταμένη ζώνη αερίων, απαραίτητη για την ανάπτυξη της ζωής, η οποία ονομάζεται **ατμόσφαιρα**. Σε κάθε περίπτωση η ατμόσφαιρα επηρεάζει την οπτική και ακουστική επαφή και συνεπώς είναι καθοριστική για τη ζωή μας. Η Γη χωρίς την ατμόσφαιρά της δεν θα είχε λίμνες ή ωκεανούς. Οι νύχτες θα ήταν υπερβολικά ψυχρές ενώ την ημέρα η θερμοκρασία θα ήταν πολύ υψηλότερη από ότι τώρα. Αν και ο αέρας είναι ένα μείγμα αερίων άγευστο, άοσμο και τις περισσότερες φορές άχρωμο, προστατεύει τη ζωή από μέρος της επικίνδυνης ηλιακής ακτινοβολίας καθώς επίσης και από συγκρούσεις με ύλη του διαστήματος (μετεωρίτες, αστεροειδείς κτλ).

Από το διάστημα η γη φαίνεται σφαιρική με διάμετρο περίπου 12800 km. Ακριβέστερες μετρήσεις δείχνουν ελαφρά συμπίεση στους πόλους και επέκταση στον ισημερινό. Το συγκεκριμένο γεωμετρικό σχήμα καλείται πεπλατυσμένο σφαιροειδές (oblate spheroid). Η απόκλιση από το κανονικό σφαιροειδές είναι μικρή με την ισημερινή διάμετρο να είναι 43 km μεγαλύτερη από την αντίστοιχη πολική διάμετρο. Σε καθημερινή βάση η Γη εκτελεί μία πλήρη περιστροφή γύρω από τον άξονά της ενώ περιστρέφεται γύρω από τον Ήλιο συμπληρώνοντας πλήρη τροχιά σε λίγο περισσότερο από 365 ημέρες. Το νερό καλύπτει περίπου τα 3/4 της επιφάνειας, κάνοντας τη Γη τον μοναδικό πλανήτη του ηλιακού μας συστήματος μπλε χρώματος. Η ατμόσφαιρα της αποτελείται κυρίως από άζωτο (N_2) και οξυγόνο (O_2) μαζί με νέφη όπου συνυπάρχουν όλες οι μορφές νερού·

αέρια υπό μορφή υδρατμών, υγρή υπό μορφή σταγονιδίων βροχής και στερεή υπό μορφή παγοκρυστάλλων. Περίπου το 99% της ατμοσφαιρικής μάζας εκτείνεται στα πρώτα 30 km από την επιφάνεια. Στην πραγματικότητα εάν η Γη συρρικνωθεί στο μέγεθος μίας μπάλας βόλλευ η ατμόσφαιρα της θα αντιστοιχεί σε πάχος ανάλογο με το πάχος ενός χαρτιού. Αν και λεπτή, η ατμόσφαιρα λειτουργεί ως ασπίδα από την επιβλαβή ηλιακή ακτινοβολία καθώς και από την εισβολή σωματιδιακής ύλης από το διάστημα.

ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΗΪΝΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ

Η ατμόσφαιρα στην παρούσα μορφή της αποτελείται από άζωτο (N_2) σε ποσοστό 78% και από οξυγόνο (O_2) σε ποσοστό 21%. Στον πίνακα 2.4 παρουσιάζονται τα ποσοστά ανά όγκο των σταθερών και των μεταβλητών αερίων της ατμόσφαιρας κοντά στην επιφάνεια της Γης. Η αναλογία αζώτου και οξυγόνου στην ατμόσφαιρα παραμένει σταθερή μέχρι το ύψος των 80 km περίπου.

ΜΟΝΙΜΑ ΑΕΡΙΑ

Αέριο	**Σύμβολο**	**Ποσοστό (ανά όγκο)**
Άζωτο	N_2	78.08
Μεθάνιο	CH_4	20.95
Οξυγόνο	O_2	0.93
Υδρογόνο	H_2	0.0018
Αργόν	Ar	0.0005
Ξένον	Xe	0.0001
Νέον	Ne	0.00005
Ήλιο	He	0.000009

ΜΕΤΑΒΛΗΤΑ ΑΕΡΙΑ

Αέριο	**Σύμβολο**	**Ποσοστό (ανά όγκο)**
Υδρατμοί	H_2O	0 εώς 4
Διοξείδιο του άνθρακα	CO_2	0.034
Όζον	O_3	0.000004
Μονοξείδιο του άνθρακα	CO	0.00002
Διοξείδιο του θείου	SO_2	0.000001
Διοξείδιο του αζώτου	NO_2	0.000001
Σωματίδια σκόνης, άλατος κλπ	$PM_{2.5}$, PM_{10}	0.00001

Πίνακας 2.4: Ποσοστό συγκέντρωσης των μονίμων και μεταβλητών αερίων στην ατμόσφαιρα.

Κοντά στην επιφάνεια επικρατεί ισορροπία στην παραγωγή και καταστροφή αυτών των αερίων. Το άζωτο απομακρύνεται από την ατμόσφαιρα μέσω βιολογικών διεργασιών από βακτήρια στο έδαφος ενώ επιστρέφει στην ατμόσφαιρα μέσω της αποσύνθεσης φυτών και ζώων. Το οξυγόνο απομακρύνεται από την ατμόσφαιρα κατά την αποσύνθεση οργανικής ύλης και στο πλαίσιο χημικών αντιδράσεων με άλλες ουσίες για την παραγωγή οξειδίων

($N_2+O_2 \rightarrow 2NO$). Επίσης κατά τη διαδικασία της αναπνοής οι πνεύμονες δεσμεύουν οξυγόνο και απελευθερώνουν διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Το οξυγόνο επανέρχεται στην ατμόσφαιρα μέσω της φωτοσύνθεσης, καθώς τα φυτά με την παρουσία της ηλιακής ακτινοβολίας, συνδυάζουν το CO_2 και το νερό για την παραγωγή οξυγόνου και σακχάρων.
Το CO_2 αποτελεί φυσικό συστατικό της ατμόσφαιρας και καταλαμβάνει μικρό αλλά πολύ σημαντικό ποσοστό όγκου του ατμοσφαιρικού αέρα (περίπου *0.034%*). Δημιουργείται κατά την αποσύνθεση της βλάστησης, κατά τις εκρήξεις ηφαιστείων, και από την καύση ορυκτών καυσίμων, όπως ο λιγνίτης, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Το CO_2 απομακρύνεται από την ατμόσφαιρα μέσω της διεργασίας της φωτοσύνθεσης, καθώς τα φυτά καταναλώνουν CO_2 για την παραγωγή χλωροφύλλης.

Οι ωκεανοί αποτελούν μία τεράστια αποθήκη για το CO_2 καθώς το φυτοπλανκτόν διατηρεί το CO_2 σε οργανικούς ιστούς. Υπολογίζεται πως οι ωκεανοί κατέχουν πάνω από *50* φορές την συνολική ποσότητα του ατμοσφαιρικού διοξειδίου του άνθρακα. Σε επόμενο κεφάλαιο μελετάμε την αύξηση της συγκέντρωσης του ατμοσφαιρικού CO_2 από το δεύτερο μισό του $20_{ου}$ αιώνα, λόγω της καύσης ορυκτών καυσίμων και της αποψίλωσης των δασών. Αξίζει να σημειωθεί πως η μέση ετήσια συγκέντρωση του CO_2 ήταν περίπου *315 ppm* κατ'όγκο στα τέλη του *1950* ενώ το *1984* έφτασε τα *340 ppm*. Επειδή το διοξείδιο του άνθρακα είναι καλός απορροφητής της γήϊνης υπέρυθρης ακτινβοβολίας, δηλαδή της θερμότητας που εκλύει η επιφάνεια της Γης, μία αύξηση της συγκέντρωσής του οδηγεί σε αντίστοιχη αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα κοντά στην επιφάνεια. Τα περισσότερα μαθηματικά μοντέλα εκτιμούν πως διπλασιασμός της συγκέντρωσης του CO_2 στην ατμόσφαιρα θα οδηγήσει σε αύξηση της μέσης θερμοκρασίας σε παγκόσμιο επίπεδο από *1.5°C* έως *4.5°C* με απρόβλεπτες συνέπειες για τα γήϊνα οικοσυστήματα.

Η ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή, η βασική πηγή ενέργειας όλων των φαινομένων, που διαδραματίζονται στη γήινη ατμόσφαιρα, είναι ο Ήλιος. Τα υπόλοιπα άστρα, το εσωτερικό της Γης, αλλά και οι ανθρωπόγενεις δραστηριότητες, προσφέρουν πολύ μικρά ποσά ενέργειας. Θεωρείται ότι σε σχέχη με τη συνολική ενέργεια που φθάνει στην ατμόσφαιρα, το 0,01% προέρχεται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, το 0,005% από το εσωτερικό της Γης και ένα ελάχιστο ποσοστό (της τάξεως του 10^{-15}) από τα άστρα.

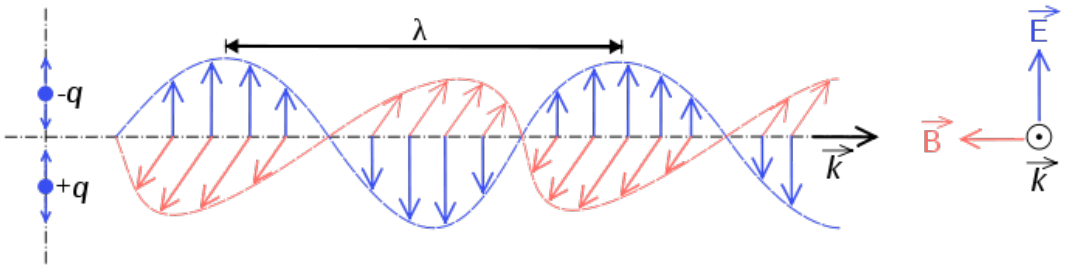
Η ηλιακή ενέργεια εκπέμπεται και διαδίδεται μέσω του διαστήματος, κυρίως με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Καθώς η Γη και η ατμόσφαιρά της απορροφούν συνεχώς ηλιακή ακτινοβολία, παράλληλα εκπέμπουν τη δική τους ακτινοβολία προς το διάστημα. Η ροή ακτινοβολίας του Ηλίου είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτή της Γης (διαφορά της τάξεως 2,6 x 10^5), παρ'όλα αυτά μπορούμε να πούμε όσο αναφορά τη Γη, ότι τα ποσοστά απορρόφησης και εκπομπής ακτινοβολίας είναι σχεδόν ίσα. Αυτό συμβαίνει γιατί μία πολύ μικρή ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας καταλήγει στη Γη και έτσι η μέση ενέργεια που απορροφά, μακροπρόθεσμα, εξισορροπείται από την

ενέργεια που εκπέμπει. Δηλαδή υπάρχει μία κατάσταη ενεργειακής ισορροπίας μεταξύ Γης-Ατμόσφαιρας και Ηλίου.

Οι μηχανισμοί διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας λειτουργούν επίσης και σαν μηχανισμός ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ της ατμόσφαιρας και της επιφάνειας του εδάφους, όπως επίσης και μεταξύ διαφορετικών στρωμάτων της ατμόσφαιρας. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία παίζει επίσης σημαντικό ρόλο σε μία σειρά από χημικές αντιδράσεις στην ανώτερη ατμόσφαιρα αλλά και στον σχηματισμό του φωτοχημικού νέφους.

Η ΦΥΣΗ ΚΑΙ ΤΟ ΦΑΣΜΑ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Σύμφωνα με την κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία του *Maxwell* η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία διαδίδεται στο χώρο με την μορφή κύματος. Συγκεκριμένα, ο *Maxwell* απέδειξε ότι, όταν ένα ηλεκτρικό φορτίο ταλαντώνεται, παράγει ηλεκτρομαγνητικό κύμα, το οποίο αποτελείται από ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό κύμα. Είναι δηλαδή ένα πεδίο με δύο χαρακτηριστικά. Την ένταση *E* του ηλεκτρικού πεδίου και την ένταση *B* του μαγνητικού πεδίου, των οποίων τα διανύσματα είναι κάθετα μεταξύ τους και μεταβάλλονται συνεχώς στο χώρο και στο χρόνο. Είναι δηλαδή δύο μεγέθη χωρικά και χρονικά μεταβαλλόμενα (Σχήμα 2.5). Είναι επίσης δύο πεδία συμφασικά (το ηλεκτρικό και το μαγνητικό). Αυτό σημαίνει ότι φθάνουν ταυτόχρονα στη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή τους, ενώ διαδίδονται με την ίδια ταχύτητα, που είναι η γνωστή ταχύτητα του φωτός *c* (για το κενό $c=3x10^8 ms^{-1}$). Με αυτή την ταχύτητα η ακτινοβολία από τον ήλιο φτάνει στη Γη σε περίπου *8.3* λεπτά διανύοντας μια απόστασηχιλιομέτρων, μεταφέροντας την ενέργεια του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 2.5: Στιγμιότυπο ηλεκτρομαγνητικού κύματος που διαδίδεται οριζόντια μακριά από την πηγή. Οι εντάσεις E και B των πεδίων είναι κάθετες στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος και γι' αυτό τα κύματα αυτά ονομάζονται εγκάρσια.

Η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος (*c*), η συχνότητα (*f*) και το μήκος κύματος (λ) συνδέονται με την σχέση, που είναι γνωστή σαν *θεμελιώδης εξίσωση της κυματικής:* **c = λ*f**

Παρά το γεγονός ότι η προαναφερόμενη κλασική θεωρία του

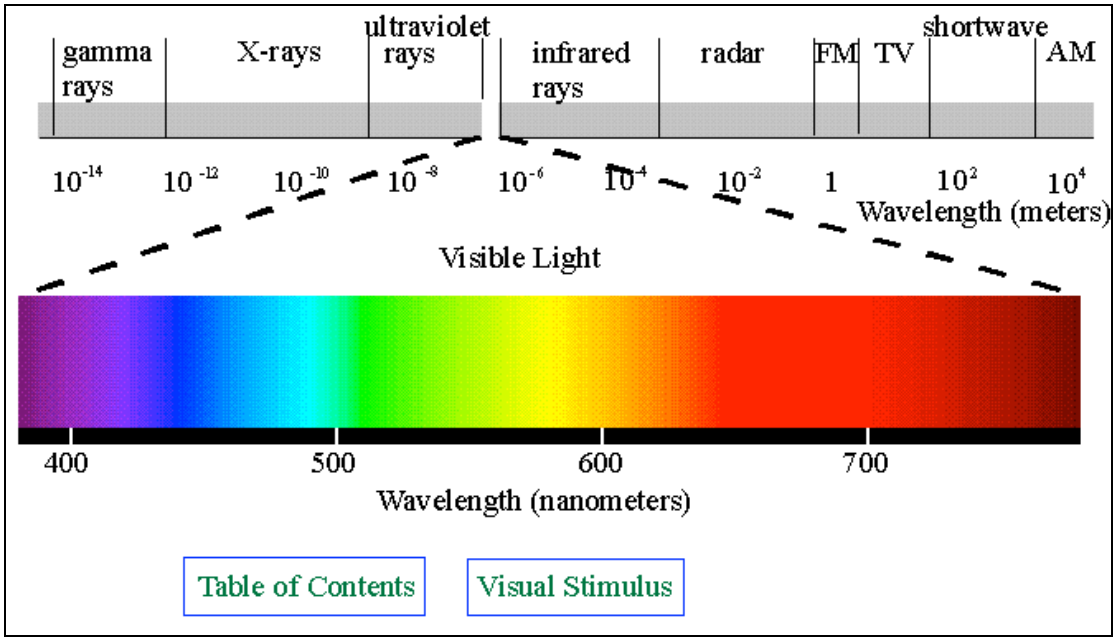
ηλεκτρομαγνητισμού ερμήνευσε ορισμένα φαινόμενα που σχετίζονται με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (συμβολή, περίθλαση, πόλωση κ.ά.), δεν ήταν σε θέση να ερμηνεύσει φαινόμενα που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη. Έτσι, το *1900* ο *Planck*, προκειμένου να ερμηνεύσει την ακτινοβολία που παράγει ένα θερμαινόμενο σώμα εισήγαγε την κβαντική θεωρία. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή κάθε άτομο εκπέμπει ή απορροφά στοιχειώδη ποσά ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Δηλαδή, από τα άτομα δεν εκπέμπονται/απορροφώνται με συνεχή τρόπο ηλεκτρομαγνητικά κύματα, αλλά εκπέμπονται/απορροφώνται αδιαίρετα "πακέτα" που φέρουν ενέργεια και ορμή και ονομάζονται φωτόνια ή κβάντα φωτός. Το κάθε φωτόνιο χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη συχνότητα (*f*) και συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας (*E*).

Η σχέση που συνδέει τα δύο μεγέθη που χαρακτηρίζουν το φωτόνιο είναι η παρακάτω:
E = h* f

όπου, το *h* είναι μία σταθερή (σταθερή του *Planck*), που είναι ίση με $6.63x10^{-34} J·s$. Τελικά, όμως, με την κβαντική θεωρία δεν αναιρείται και η κυματική φύση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, καθώς θεωρείται ότι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία έχει και κυματικό και σωματιδιακό χαρακτήρα. Αυτό σημαίνει ότι στην πράξη άλλα φαινόμενα εξηγούνται με τη θεώρηση ότι η ακτινοβολία συμπεριφέρεται σαν κύμα (ηλεκτρομαγνητικό) ενώ σε άλλα φαινόμενα συμπεριφέρεται σαν σωματίδιο (θεώρημα De Broglie), το οποίο όμως έχει και κυματικές ιδιότητες.

Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

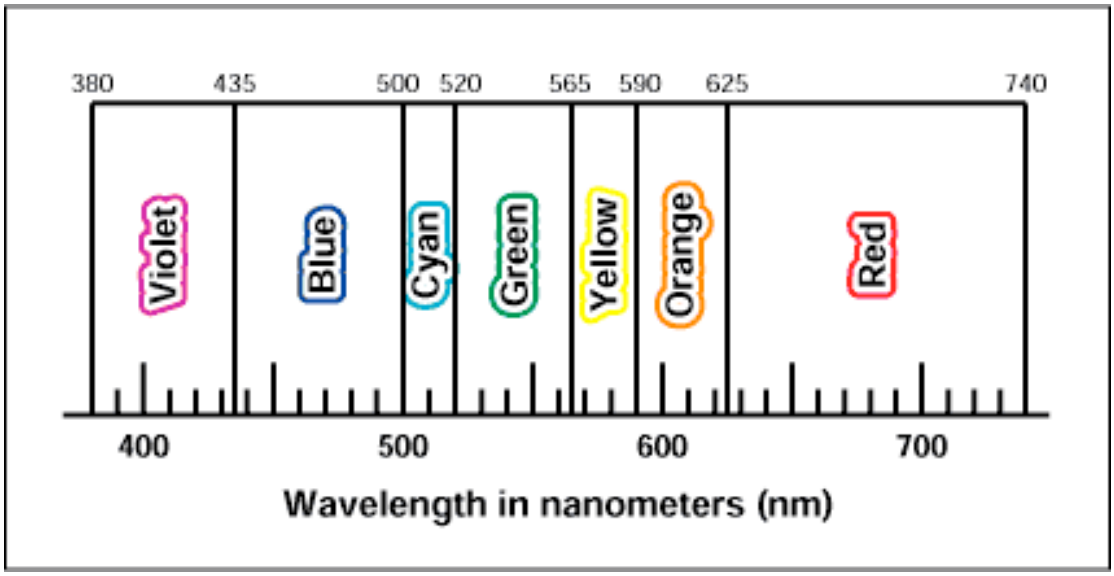
Το σύνολο των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (όλα τα δυνατά μήκη κύματος) συνιστούν το λεγόμενο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (σχήμα 2.6). Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα δεν έχει πάνω ή κάτω φράγμα. Κύματα στο άκρο των υψηλών συχνοτήτων του φάσματος (ακτίνες *γ*) έχουν μήκη κύματος ίδιας τάξης μεγέθους με τις διαστάσεις των ατομικών πυρήνων, ενώ στο άλλο άκρο του φάσματος τα μήκη κύματος φτάνουν στο *1/10* της απόστασης Ηλίου-Γης.



Σχήμα 2.6: Σχηματική αναπαράσταση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Φαίνεται η περιορισμένου εύρους φασματική περιοχή που συνιστά το ορατό φως.

Υπάρχει μία περιοχή του φάσματος, που συνιστά το ορατό τμήμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Αυτές οι ακτινοβολίες είναι ιδιαίτερες, επηρεάζουν το ανθρώπινο μάτι, χαρακτηρίζονται από ένα συγκεκριμένο χρώμα (Πίνακας 2.7) και αναφέρονται στην μη επιστημονική γλώσσα απλά ως «φως». Μία σειρά από φαινόμενα, όπως η ορατότητα της ατμόσφαιρας, το χρώμα του ουρανού ή ακόμη και το γεγονός ότι γίνονται ορατά τα νέφη, οφείλονται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της διάδοσης της ακτινοβολίας με μήκη κύματος που εμπίπτουν στο ορατό τμήμα του φάσματος. Τα όρια του ορατού φάσματος δεν ορίζονται σαφώς γιατί ή καμπύλη ευαισθησίας του ματιού πλησιάζει στον άξονα ασυμπτωτικά και προς τις δύο πλευρές. Αν, αυθαίρετα, ληφθούν σαν όρια τα μήκη κύματος στα οποία η ευαισθησία του ματιού έχει μειωθεί στο *1%* της μέγιστης τιμής της, τότε αυτά τα όρια είναι περίπου *0.39 μm* (το κατώτερο) και *0.76 μm* (το ανώτερο).

Για τη μελέτη της ατμόσφαιρας το τμήμα του φάσματος που μας ενδιαφέρει εκτείνεται από 10^{-2} *μm* έως 10^{2}*μm*, δηλαδή από το υπεριώδες μέχρι και το υπέρυθρο. Αξίζει να σημειωθεί ότι από το σύνολο της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που εκπέμπει ο ήλιος, το *50%* περίπου εμπίπτει στο υπέρυθρο($\lambda>0.7$ *μm*), το *40%* περίπου βρίσκεται στην περιοχή του ορατού (*0.4-0.7 μm*) και περίπου το *10%* στο υπεριώδες ($\lambda<0.4$ *μm*). Το υπεριώδες μέρος του φάσματος με $\lambda<0.3$ *μm* είναι η βασική πηγή ενέργειας για την ατμόσφαιρα σε ύψη πάνω από *10 km*, ενώ μια χαρακτηριστική εφαρμογή των ιδιοτήτων της υπέρυθρης ακτινοβολίας, που εκπέμπεται από την ατμόσφαιρα προς το διάστημα, είναι ότι αφού καταγραφεί από τους δορυφόρους χρησιμοποιείται για την εξ αποστάσεως αποτύπωση (remote sensing) της δομής της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας.



Πίνακας 2.7: Μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και αντίστοιχα χρώματά τους

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Η θερμοκρασία στην πράξη είναι ακριβώς το μέτρο εκείνο με το οποίο προσδιορίζεται η θερμική κατάσταση των διαφόρων σωμάτων, είναι δηλαδή ένα φυσικό μέγεθος που συνδέεται με την μέση κινητική ενέργεια των σωματιδίων ενός συστατικού, το οποίο και χαρακτηρίζει πόσο θερμό ή πόσο ψυχρό είναι αυτό. Ορίζεται θερμοδυναμικά με το μηδενικό αξίωμα της Θερμοδυναμικής κατά το οποίο:

Αν Α σώμα θερμότερο από Β σώμα ($T_A > T_B$)
και Β σώμα θερμότερο από Γ σώμα ($T_B > T_Γ$)
τότε Α θερμότερο από Γ ($T_A > T_Γ$)

Το αίτιο που δημιουργεί το αίσθημα του θερμού ή ψυχρού είναι η θερμότητα που όταν απορροφάται ή εκλύεται από ένα σώμα προκαλεί μεταβολή θερμοκρασίας. Συνεπώς θερμότητα και θερμοκρασία είναι διαφορετικές έννοιες. Η μεν θερμότητα είναι μορφή ενέργειας, η δε θερμοκρασία ιδιότητα και μέγεθος.

1°C = 274.15K = 33.8°F = 493.5Ra = 0.8Re

Οι διάφορες κλίμακες μέτρησης της θερμοκρασίας

Κάθε θερμοκρασία που έχει ως αρχή μέτρησης το απόλυτο μηδέν χαρακτηρίζεται απόλυτη θερμοκρασία. Το απόλυτο μηδέν είναι η θερμοκρασία από την οποία ξεκινά η κλίμακα Κέλβιν και που προσδιορίζεται στην κλίμακα Κελσίου στους -273,15°C. Θεωρητικά είναι η κατάσταση εκείνη στην οποία ένα υλικό δεν έχει καμία άλλη ενέργεια παρά αυτή από τις κβαντομηχανικές ταλαντώσεις των ατόμων που το αποτελούν. Η μέγιστη τιμή θερμοκρασίας που

μπορεί να υπάρξει θεωρητικά είναι 10^{51}K, αφού με τέτοια θερμοκρασία υπολογίζεται ότι τα άτομα θα κινούνται με την ταχύτητα του φωτός.

χαρακτηριστικές θερμοκρασίες	°C	K
απόλυτο μηδέν	-273,15	0
ελάχιστη μέτρηση στη Γη (Vostok)	-88,3	184,85
τήξη του πάγου	0	273,15
μέση θερμοκρασία Γης	15	288,15
μέγιστη μέτρηση στη Γη (Λιβύη)	57,8	330,95
βρασμός νερου	100	373,15
μέση θερμοκρασία Αφροδίτης	460	733,15
επιφάνεια Ήλιου	6000	6273,15
μέγιστη θεωρητική τιμη	10^{51}	10^{51}

Πίνακας 2.8: Διάφορες χαρακτηριστικές τιμές θερμοκρασίας

Ο ατμοσφαιρικός αέρας θερμαίνεται αφ΄ενός από τις ηλιακές ακτίνες που τον διαπερνούν και αφ΄ετέρου από την επιφάνεια του εδάφους που θερμαίνεται επίσης από την ηλιακή ακτινοβολία, πολύ όμως ισχυρότερα του αέρος. Γι αυτό και τα κατώτερα στρώματα της ατμοσφαίρας είναι θερμότερα των υπερκειμένων. Η ένταση αυτή της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια του εδάφους, είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος του Ηλίου (κάθετα). Επίσης η θερμοκρασία αυτή ελαττώνεται μέσα στη τροπόσφαιρα κατά 0,64°C/100m (κατακόρυφη θερμοβαθμίδα). Έτσι π.χ. αν η θερμοκρασία στην επιφάνεια της ξηράς ή θαλάσσης είναι 20°C, τότε σε ύψος 1000m η θερμοκρασία θα είναι περίπου 14°C. Κατά τις ανέφελες νύχτες η επιφάνεια του εδάφους λόγω έντονης ακτινοβολίας αρχίζει και ψύχεται πολύ περισσότερο του υπερκείμενου αέρα. Τα κατώτερα επομένως στρώματα θα έχουν θερμοκρασία μικρότερη των υπερκειμένων τους, δηλαδή η θερμοκρασία κατά ύψος μέχρις ενός σημείου θα αυξάνει αντί να μειώνεται. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται θερμοκρασιακή αναστροφή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΥΝΤΟΜΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΕ ΑΠΛΑ ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Η IPCC πιστεύει ότι τα απλά μοντέλα για κάθε παράγοντα που επηρέαζει το κλίμα ξεχωρίστα είναι προτιμότερα από ένα πολύπλοκο μοντέλο.

Ένα απλό κλιματικό μοντέλο παρέχει πληροφορίες μόνο για τη μέση παγκόσμια θερμοκρασία.
Πληροφορίες σχετικές με τις κλιματικές αλλαγές τοπικά, αλλαγές σε άλλες παραμέτρους (π.χ. βροχόπτωση) κ.λ.π. δίνονται μόνο με τη χρήση τρισδιάστατων πολύπλοκων μοντέλων κλιματικών αλλαγών.

Η μαθηματική προσομοίωση του κλίματος πραγματοποιείται με την εφαρμογή νόμων της φυσικής όπως:
-Διατήρηση της μάζας
-Διατήρηση momentum (ορμή)
-Διατήρηση της Ενέργειας

Σε ένα μοντέλο είναι απαραίτητο να παρουσιάζεις τις φυσικές ποσότητες, οι οποίες μεταβάλλονται συνεχώς στο διάστημα (π.χ. θερμοκρασία, υγρασία και ταχύτητα ανέμου) με τις τιμές τους σε ένα ορισμένο αριθμό σημείων.

Στα περισσότερα πολύπλοκα μοντέλα οι ποσότητες παρουσιάζονται με πλέγμα τριών διαστάσεων.

Απλούστερα κλιματικά μοντέλα μπορούν και παρουσιάζουν τις φυσικές ποσότητες ως μέση τιμή σε μία ή περισσοτερές χωρικές διαστάσεις.
Για παράδειγμα, αντί να χρησιμοποιηθεί ένα πλέγμα τριών διαστάσεων, δύναται να χρησιμοποιηθεί αντ' αυτού ένα πλέγμα δύο διαστάσεων όπου κάθε σημείο αποτελεί μέση τιμή πάνω στην Τρίτη διάσταση.

ΚΛΙΜΑ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

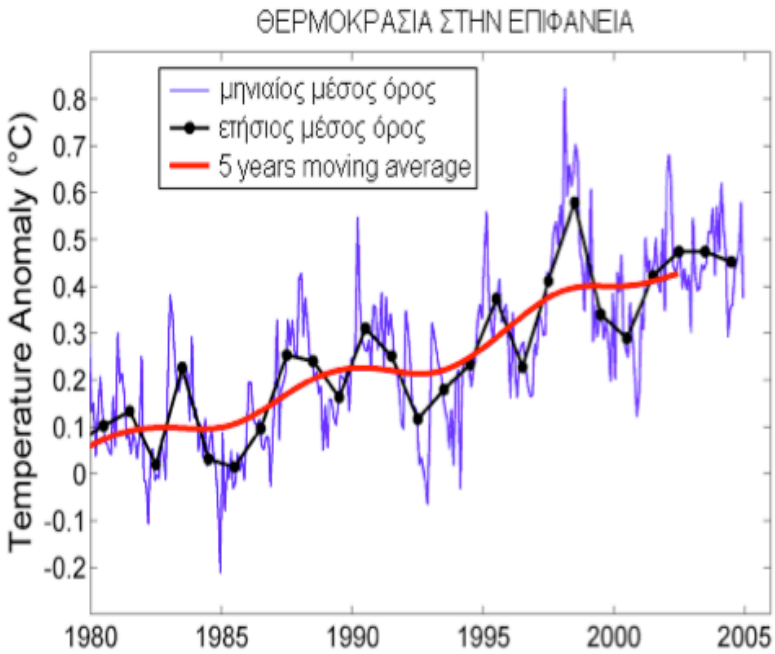
Κλίμα ονομάζεται η μέση καιρική κατάσταση ή καλύτερα ο μέσος καιρός μιας περιοχής, που προκύπτει από τις μακροχρόνιες παρατηρήσεις των διάφορων μετεωρολογικών στοιχείων. Το κλίμα επομένως είναι κάτι διαφορετικό από τον καιρό, που χαρακτηρίζεται σαν μια φυσική κατάσταση της ατμόσφαιρας κατά τη διάρκεια μιας μικρής χρονικής περιόδου. Το κλίμα παίζει σπουδαιότατο ρόλο, τόσο στο φυτικό όσο και στο ζωικό βασίλειο. Από το κλίμα ορίζονται οι ζώνες της βλάστησης καθώς και η κατανομή των ζώων και των ανθρώπων πάνω στη γη. Ο τύπος ενός κλίματος συνήθως καθορίζεται από την ταξινόμηση κατά Köppen, που υιοθετεί διαφορετικές κλιματικές ζώνες με βάση τη βλάστηση κάθε περιοχής.

Οι παράγοντες που συντελούν στη μεταβολή του κλίματος από τόπο σε τόπο είναι:

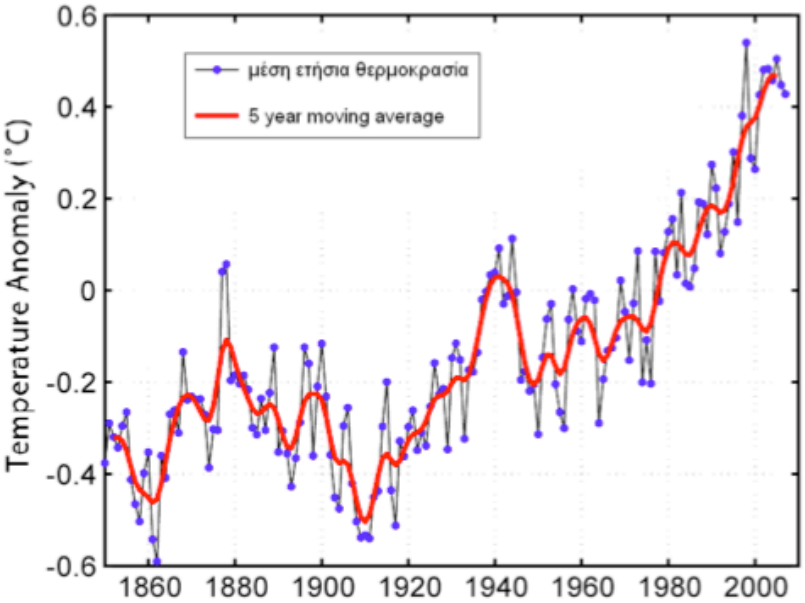
- γεωγραφικό πλάτος και υψόμετρο
- κατανομή ξηράς και θάλασσας
- ανάγλυφο και κάλυψη του εδάφους
- άνεμοι
- κέντρα υψηλής και χαμηλής πίεσης κ.ά.

Κλιματική Αλλαγή

Ο όρος παγκόσμια θέρμανση (global warming) δηλώνει μία ειδική περίπτωση κλιματικής μεταβολής και αναφέρεται στην αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας της γης και των ωκεανών που παρατηρείται από το 1800 μέχρι και σήμερα, δηλαδή στη λεγόμενη «βιομηχανική περίοδο».



***Σχήμα 3.1**: Η διακύμανση της παγκόσμιας θερμοκρασίας στα έτη 1980-2005*

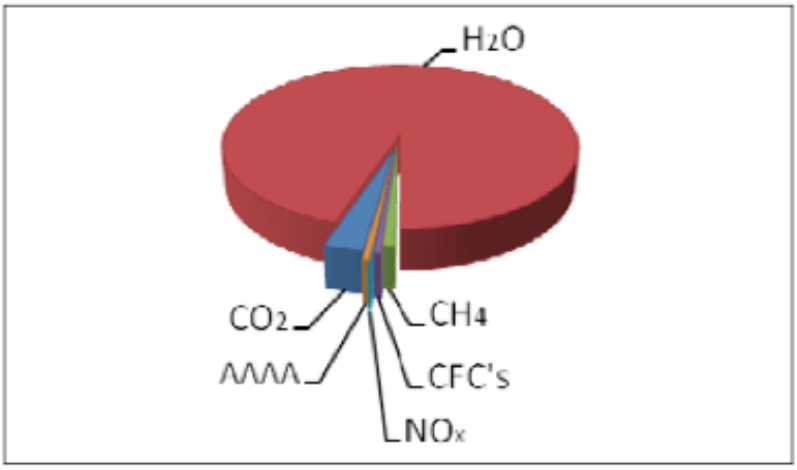


Σχήμα 3.2*: Η διακύμανση της παγκόσμιας θερμοκρασίας στα έτη 1850-2005*

Όσον αφορά την κλιματική μεταβολή που παρατηρείται στη βιομηχανική εποχή, από το 1800 μέχρι και σήμερα, με τις ανοδικές τάσεις που παρατηρηούνται (βλέπε μετρήσεις θερμοκρασίας, σχήματα), τα αίτια φαίνεται να είναι τα εξής:
1) τεκτονικές αιτίες
2) αστρονομικές αιτίες
3) ατμοσφαιρικές αιτίες
4) ανθρωπογενείς αιτίες
Το μέγεθος και η συνεισφορά της κάθε αιτίας στο φαινόμενο της πρόσφατης θέρμανσης του πλανήτη είναι αντικείμενο μελέτης και συζήτησης στην επιστημονική κοινότητα. Η πιο δημοφιλής θεωρία είναι αυτή που συνδέει την υπερθέρμανση του πλανήτη με την αύξηση της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου (και κυρίως του CO_2) στην ατμόσφαιρα λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας. Αυτή η αύξηση, λένε οι υποστηρικτές τις θεωρίας, προκαλεί την ένταση του φαινομένου του θερμοκηπίου, με ένα μηχανισμό που θα παρουσιαστεί συνοπτικά παρακάτω.
Άλλοι επιστήμονες, αρνούνται αυτή την άποψη και επιμένουν στα συμπεράσματα των παλαιοκλιματολογικών δεδομένων, θεωρώντας την ανθρώπινη «συνεισφορά» αμελητέα μπροστά στην περιοδικότητα των κλιματικών μεταβολών. Για αυτούς, η κλιματική μεταβολή προκαλείται από την ηφαιστειακή δράση, τις τεκτονικές μεταβολές και τις περιοδικές (ή μη) αλλαγές στην ηλιακή δραστηριότητα. Η πιο δημοφιλείς από αυτές τις θεωρίες, όπως παρουσιάζεται συνοπτικά παρακάτω, είναι η θεωρία των ηλιακών κηλίδων, καθώς και οι κύκλοι του Milankovitch.

Φαινόμενο του θερμοκηπίου

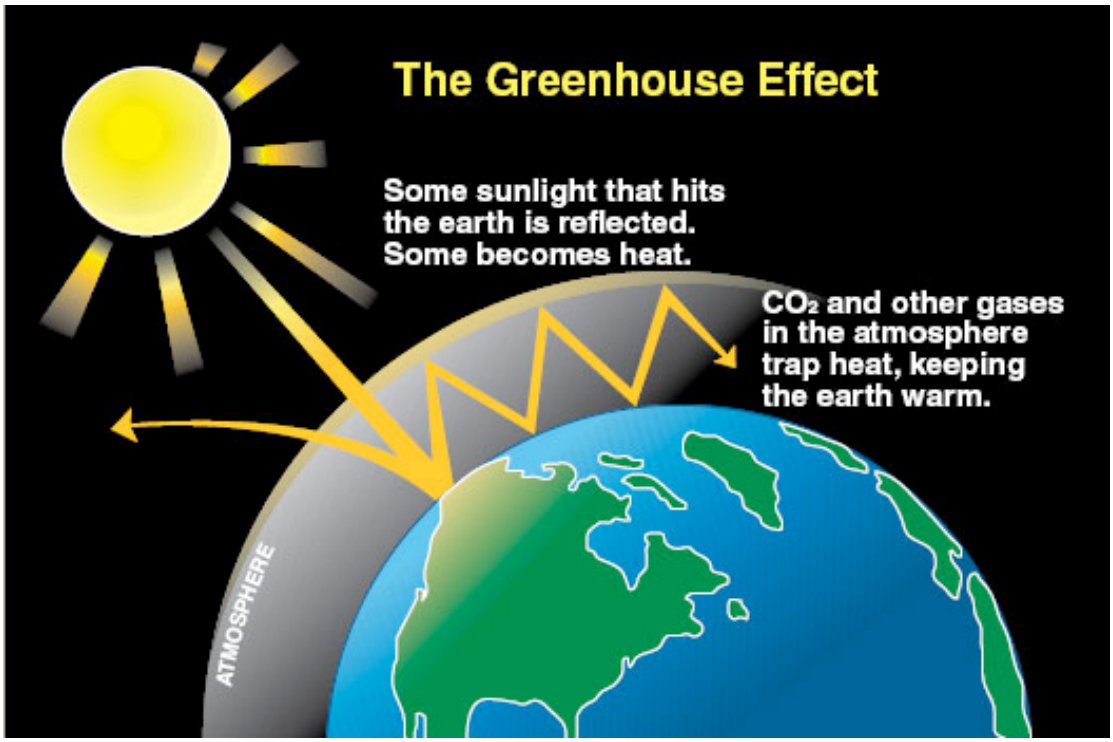
Αντιλαμβανόμαστε εύκολα, με βάση το 2ο κεφάλαιο, ότι αν η Γη δεν είχε ατμόσφαιρα, καθώς θα έπεφτε πάνω στην επιφάνεια της η μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία, ένα μέρος της ανακλόταν και θα επέστρεφε στο διάστημα, ενώ το μεγαλύτερο τμήμα της θα απορροφούνταν και στη συνέχεια θα επανεκπεμπόταν στο διάστημα με τη μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η Γη τότε θα είχε θερμοκρασία ίση με την ενεργό θερμοκρασία, δηλαδή -18°C και η επιφάνεια της θα ήταν μια απέραντη παγωμένη έκταση, αφιλόξενη για τις περισσότερες μορφές ζωής που γνωρίζουμε σήμερα. Χάρη όμως στην ατμόσφαιρα και τις θερμοσυλλεκτικές ιδιότητες ορισμένων από τα αέρια που μετέχουν στη σύνθεση της, η μέση θερμοκρασία της Γης ανέβαινε κατά 33°C και βρίσκεται στο πρόσφορο για τη βιόσφαιρα επίπεδο των 15°C. Αυτό το φαινόμενο παρατηρήθηκε πρώτη φορά το 1827, από τον Γάλλο *Jean Fourier* και παρομοιάστηκε με τη λειτουργεία του θερμοκηπίου. Αργότερα, το 1896, ο Σουηδός *Svarnte Arrhenius* υποστήριξε ότι η θερμοκρασία της επιφάνειας της Γης επηρρεάζεται σημαντικά από τα αέρια που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα, τα οποία έχουν την ιδιότητα να συγκρατούν θερμότητα. Έμεινε έτσι σχηματικά να αποκαλούμε το φαινόμενο «φαινόμενο του θερμοκηπίου» και τα αέρια που ευθύνονται γι'αυτό «αέρια θερμοκηπίου».



***Σχήμα 3.3**: Η εκτιμούμενη ποσοστιαία συμμετοχή των διαφόρων αερίων στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (δεδομένα: Griffin,"Principles of Air Quality", 1994)*

Μηχανισμός: Η Γη δέχεται συνολικά ηλιακή ακτινοβολία, που αντιστοιχεί σε ροή περίπου 1360 W/m^2, στο όριο της ατμόσφαιρας. Ένα μέρος αυτής απορροφάται από το σύστημα Γης-ατμόσφαιρας, ενώ το υπόλοιπο διαφεύγει στο διάστημα. Περίπου το 30% της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας ανακλάται, σε ποσοστό 6% από την ατμόσφαιρα, 3% από τα νέφη και 4% από την επιφάνεια της Γης. Το 70% της ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται, κατά 16% από την ατμόσφαιρα (συμπεριλαμβανομένου και του στρατοσφαιρικού στρώματος του όζοντος), κατά 3% από τα νέφη και κατά το μεγαλύτερο ποσοστό (51%) από την επιφάνεια και τους ωκεανούς. Λόγω της θερμοκρασίας της, η Γη εκπέμπει επίσης θερμική ακτινοβολία (κατά τρόπο ανάλογο με τον Ήλιο), η οποία αντιστοιχεί σε μεγάλα μήκη κύματος, σε αντίθεση με την αντίστοιχη ηλιακή

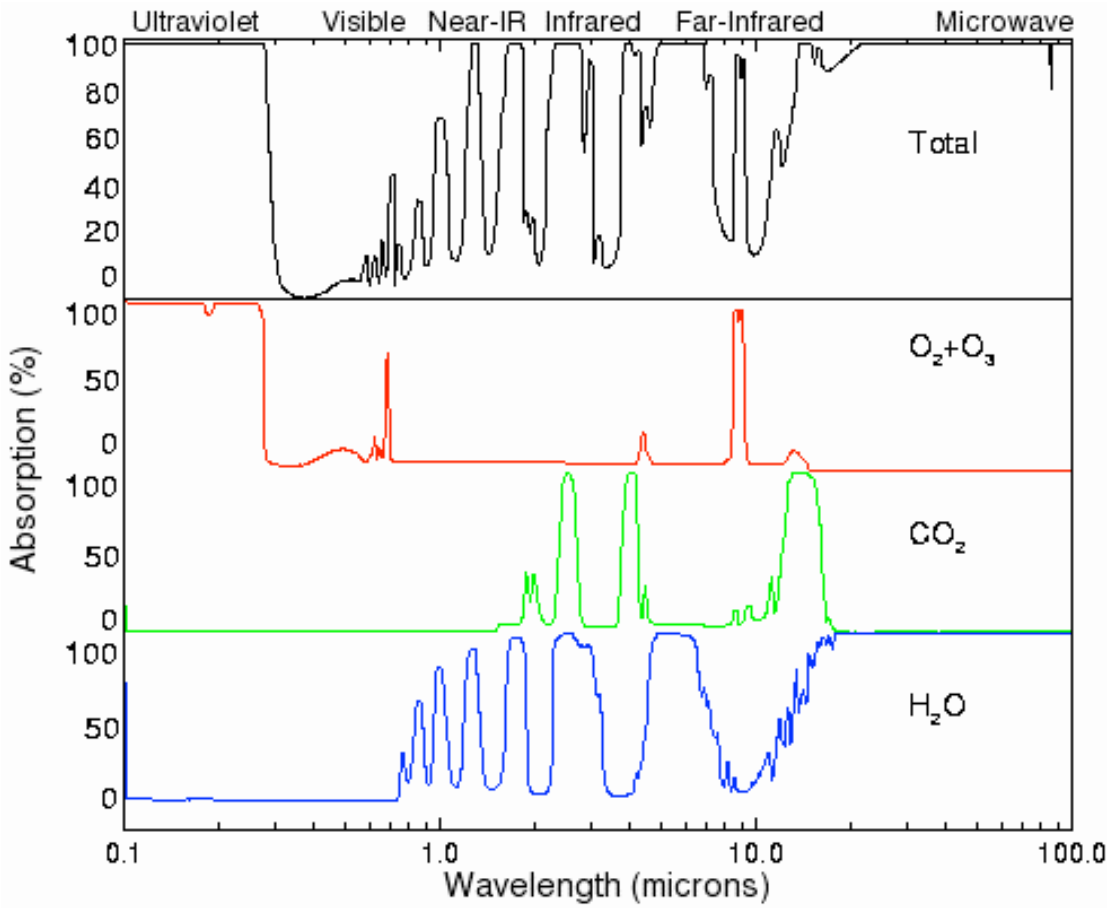
ακτινοβολία, που είναι μικρού μήκους κύματος. Η ατμόσφαιρα της Γης διαθέτει μεγάλη αδιαφάνεια στην, μεγάλου μήκους κύματος, γήινη ακτινοβολία, έχει δηλαδή την ικανότητα να απορροφά το μεγαλύτερο μέρος
της, ποσοστό περίπου 71%. Η ίδια η ατμόσφαιρα επανεκπέμπει θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, μέρος της οποίας απορροφάται από την επιφάνεια της Γης, η οποία θερμαίνεται ακόμη περισσότερο. Η γήινη ατμόσφαιρα συμπεριφέρεται, με τον τρόπο αυτό, ως μία δεύτερη - μαζί με τον Ήλιο - πηγή θερμότητας. Αποτέλεσμα του συνολικού φαινομένου είναι η αύξηση της μέσης επιφανειακής θερμοκρασίας, γεγονός που καθιστά τη Γη κατοικήσιμη.



Σχήμα 3.4: Σχηματική παρουσίαση του μηχανισμού του φαινομένου του θερμοκηπίου

Από το σχήμα προκύπτει ότι μια ομάδα αερίων, που μετέχουν σε μικρά ποσοστά στη σύσταση του ατμοσφαιρικού αέρα,απορροφούν την ακτινοβολούμενη από την επιφάνεια της Γης μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία και μέρος αυτής το επανεκπέμπουν πίσω στη γήινη επιφάνεια. Αυτά τα αέρια είναι οι υδρατμοί (H_2O), το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το όζον (O_3), το μεθάνιο (CH_4), το υποξείδιο του αζώτου (N_2O) και οι χλωροφθοράνθρακες (CFC's), οι οποίοι δεν αποτελούσαν συστατικό του αέρα αλλά προστέθηκαν από την ανθρωπογενή ρύπανση.

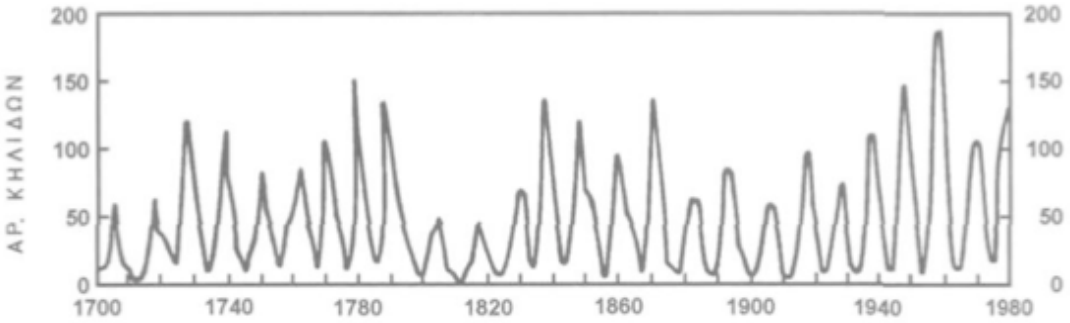
Σύμφωνα με τον *Dr. Geoffrey G. Duffy,* οι υδρατμοί συμπυκνώνονται σε μορφή νέφους και είναι μακράν το πιο άφθονο και σημαντικό από τα αέρια του θερμοκηπίου. Το νερό αντιπροσωπεύει περίπου το 95% του φαινομένου του θερμοκηπίου (βλ. σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.5: *Η ικανότητα απορρόφησης ανάλογα με το μήκος κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας από τα διάφορα συστατικά της ατμόσφαιρας και από την ατμόσφαιρα συνολικά (πηγή: R.G.Fleagle, An introduction to Atmospheric Physics, 1963)*

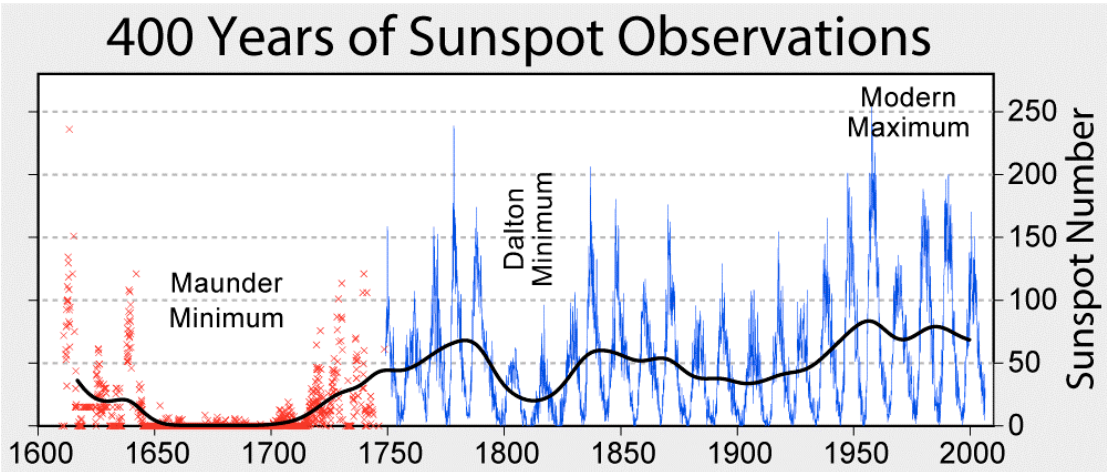
Η θεωρία των ηλιακών κηλίδων

Ο *Willett* δέχεται ότι οι κύκλοι του κλίματος οφείλονται στις μεταβολές της ακτινοβολίας που προέρχονται από τις διαταραχές της δράσης των ηλιακών κηλίδων. Ο Willett πιστεύει ότι η ομαλή ηλιακή δραστηριότητα μπορεί να εξηγήσει τους κύκλους του κλίματος που παρατηρήθηκαν από την αρχή της Πλειστοκαίνου εποχής μέχρι σήμερα και ότι οι κλιματικές μεταβολές δεν είναι αποτέλεσμα του συνόλου του ηλιακού φάσματος αλλά ενός τμήματος του. Μια αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας της τροπικής Στρατόσφαιρας και της Ιονόσφαιρας. Αύξηση της θερμοκρασίας των ανώτερων τμημάτων της ατμόσφαιρας, ενισχύει σημαντικά τη ζωνική κυκλοφορία. Η θέρμανση της πολικής στρατόσφαιρας από τη σωματιδικά ηλιακή ακτινοβολία δημιουργεί κλιματικέ εντάσεις, υψηλής χαοτικής περιόδου που εκδηλώνονται με αξιοσημείωτα ακραία φαινόμενα τα οποία όμως σχετίζονται με τις βροχοπτώσεις και τη θερμοκρασία των μέσων γεωγραφικών πλατών. Επίσης με φαινόμενα παρεμπόδισης της γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας, από την εμφάνιση ισχυρών αντικυκλώνων, καθώς και διαδοχικά θερμά και ξηρά καλοκαίρια.



***Σχήμα 3.6**: Η χρονοσειρά των ετήσιων τιμών του αριθμού Wolf των ηλιακών κηλίδων (Α.Α.Μπλούτσος, 1998)*

Ορισμένες φορές η επίδραση της δραστηριότητας των ηλιακών κηλίδων στις κλιματικές αλλαγές είναι πολύ δυσδιάκριτη. Αναλύωντας κατά Fourier τα δεδομένα 300 περίπου ετών της ηλιακής δραστηριότητας προκύπτει ότι εκτός της αρμονικής των 11 περίπου ετών, μια άλλη σημαντική αρμονική είναι αυτή των 80 ετών. Η αρμονική αυτή χαρακτηρίζεται από μια βαθμιαία αύξηση του μέγιστου των ηλιακών κηλίδων, από ένα πολύ χαμηλό επίπεδο στην αρχή, σε ένα πολύ υψηλό επίπεδο στο τέλος της 80χρονης περιόδου. Ο Willett συνδυάζει την ηλιακή δραστηριότητα του πρώτου τετάρτου αυτής της αρμονικής (1800-1820) με την αύξηση της ζωνικής ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας των μικρών γεωγραφικών πλατών και την αύξηση της παγοκάλυψης (1880-1890).
Η θέρμανση και η υποχώρηση των πάγων συνέβει στη διάρκεια του τρίτου τετάρτου της αρμονικής των 80 ετών. Αυτή την 20ετία, το κλίμα των περιοχών πάνω από τις 50° ήταν θερμό και υγρό, ενώ κάτω από αυτές ήταν θερμό και ξηρό. Στο τελευταίο τέταρτο της αρμονικής, που το μέγιστο των κηλίδων έφτασε στο ψηλότερο επίπεδο, η ατμοσφαιρική κυκλοφορία στα μεγάλα ηπειρωτικά, γεωγραφικά πλάτη ήταν έντονα μεσημβρινή με θερμά και ξηρά καλοκαίρια. Μια τέτοια αρμονική τελείωσε το 1957.

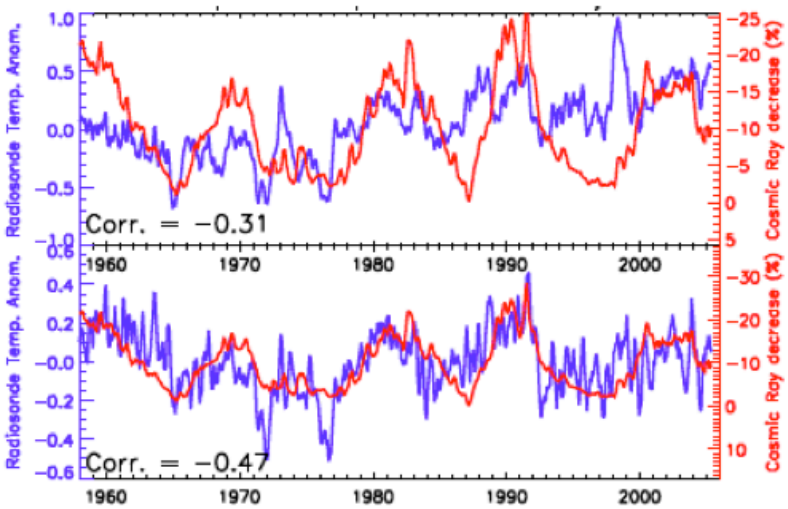


***Σχημα 3.7:** Παρατήρηση του αριθμού των ηλιακών κηλίδων για 400 έτη.*

Οι ηλιακές κηλίδες επιδρούν στη διαμόρφωση των γήινων κλιματολογικών συνθηκών καθώς και στην ανάπτυξη των δέντρων. Τα μέγιστα των ηλιακών κηλίδων συμπίπτουν με την μέγιστη ανάπτυξη των δέντρων, που δείχνει μια θερμή εποχή με άφθονες βροχοπτώσεις. Μια σημαντική, αλλά μη αποδεδειγμένη εποχή, είναι η εποχή του «ελαχίστου του Maunder», περίοδος μεταξύ των ετών 1645-1715, που θεωρείται ότι συμπίπτει με την παντελή έλλειψη ηλιακών κηλίδων με το δριμύ ψύχος που επικρατούσε τότε σε όλο το βόρειο ημισφαίριο. Η εποχή αυτή τεκμηριώνεται από ιστορικά δεδομένα και ονομάζεται μικρή εποχή των παγετώνων (Little Ice Age-σχήμα 2.17) κατά τη διάρκεια της οποίας τα ποτάμια πάγωναν και τα χιόνια παρέμεναν και στα χαμηλά υψόμετρα χωρίς να λιώνουν. Υπάρχουν βέβαια αποδείξεις ότι ο ήλιος διένυσε τέτοιες περιόδους και στο πιο μακρινό παρελθόν.

Ο διπλός κύκλος των ηλιακών κηλίδων (21 έτη) είναι μικρότερος και επομένως η σύνδεση του με τις κλιματικές μεταβολές δεν είναι πάντοτε προφανής. Κατά τον Willett, οι κλιματικές μεταβολές, στη διαρκεια του 80ετούς κύκλου, συσχετίζονται με τις μεταβολές της εντάσεως του υπεριώδους και ορατού τμήματος του φάσματος. Επίσης οι μεταβολή της ποσότητας του όζοντος των των μεγάλων γεωγραφικών πλατών συσχετίζεται με το διπλό κύκλο των ηλιακών κηλίδων, γεγονός που αμφισβητείται από αρκετούς ερευνητές. Η θεωρία των ηλιακών κηλίδων τυγχάνει ευρείας αποδοχής από σημαντικό αριθμό Μετεωρολόγων, Γεωλόγων και Αστρονόμων.

Ο Δανός καθηγητής Eigil Friis-Christensen και η ερευνητική του ομάδα παρατήρησαν υψηλή συσχέτιση μεταξύ της διακύμανσης της θερμοκρασίας και της ηλιακής δραστηριότητας τον τελευταίο αιώνα. Επειδή θα μπορούσε να είναι σύμπτωση επανέλαβε τη μελέτη για τα τελευταία 450 χρόνια και βρήκε πάλι πολύ υψηλή συσχέτιση. Επίσης η μελέτη τους συμπεριέλαβε τις κοσμικές ακτίνες. Θεώρησαν ότι σε μια περίοδο με αυξημένη ηλιακή δραστηριότητα, προκαλείται μείωση των κοσμικών ακτίνων που φτάνουν στη Γη, με αποτέλεσμα τη μείωση του σχηματισμού συννέφων και έτσι την ακόμα μεγαλύτερη αύξηση της ηλιακής ενέργειας που φτάνει στη Γη. Τα αποτελέσματα τους δικαίωσαν (σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.8*: Πάνω: Αρνητική συσχέτιση των μεταβολών της θερμοκρασίας με τις κοσμικές ακτίνες. Κάτω: το ίδιο αφού αφαιρέθηκαν οι επιρροές του El Nino και της ηφαιστειακής δράσης (ESA-ISAC, 2006)*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Ο στόχος της κατασκευής του μοντέλου μας, είναι η παρατήρηση της επιρροής των εναλλαγών της ηλιακής ακτινοβολίας, στη μέση θερμοκρασία του πλανήτη Γη. Σε ένα δεύτερο επίπεδο, θα παρατηρήσουμε και θα συγκρίνουμε αυτήν την επιρροή της ηλιακής ακτινοβολίας, σε σχέση με την επιρροή των αερίων του θερμοκηπίου και πιο συγκεκριμένα του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2).

Ένα κλιματικό μοντέλο το οποίο θα συμπεριλάμβανε όλη τη μέχρι τώρα γνώση για το σύστημα του κλίματος, θα ήταν πολύ περίπλοκο να τρέξει σε έναν συμβατικό υπολογιστή.

Για πρακτικούς λόγους λοιπόν θα πρέπει να γίνουν κάποιοι συμβιβασμοί.

Όσο αυτό είναι δυνατό, τα κλιματικά μοντέλα χρησιμοποιούν αρχές της φυσικής ή απλοποιήσεις οι οποίες οδηγούν σε ελάχιστη αβεβαιότητα. Αυτό είναι απαραίτητο γιατί οι συνθήκες ενός μεταβαλλόμενου κλίματος, μπορεί να είναι πολύ διαφορετικές από τις παρούσες συνθήκες, κάτι που σημαίνει ότι οι σχέσεις που προέρχονται εμπειρικά ή στατιστικά από το υπάρχον κλίμα δε σημαίνει ότι ισχύουν υποχρεωτικά.

ΠΛΑΙΣΙΟ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ

Αντιμετωπίζοντας τα φαινόμενα των κλιματικών αλλαγών σαν μία διεργασία, ενδιαφερόμαστε αρχικά σε μια μέση θερμοκρασία της Γης. Λόγω αυτής της χρονικής κλίμακας, η προσέγγισή μας μπορεί να είναι η Διεργασία της Ισορροπίας και όχι η Διεργασία της Μεταφοράς (ρυθμών μεταφοράς). Εφαρμόζουμε λοιπόν Ισοζύγια.
Σε πρώτη ανάλυση θεωρούμε τον πλανήτη Γη, ακτίνας R_E περιβαλόμενο από μονοστρωματική ατμόσφαιρα.

Η βασική αρχή του ισοζυγίου που θα χρησιμοποιήσουμε είναι ότι η ηλιακή ακτινοβολία, προσπίπτει σε γήινη επιφάνεια διατομής πR_E^2, ενώ επανεκπέμπεται από όλη την επιφάνεια της γήινης σφαίρας $4\,\pi R_E^2$.

Ο παράγοντας ατμόσφαιρα υπολογίζεται στους συντελεστές απορρόφησης:
α_v: Απορροφητικότητα της ατμόσφαιρας στο ορατό υπεριώδες
α_{IR}: Απορροφητικότητα της ατμόσφαιρας στο υπέρυθρο

Επιπλέον στην προσπίπτουσα ακτινοβολία, πρέπει να λάβουμε υπόψιν τη σταθερά Albeldo, A.

Προσπίπτουσα Ενέργεια

$\mathbf{E_{in} = S*(1-A)*\pi*R_E^2}$

S: η ηλιακή σταθερά, η οποία στην περίπτωσή μας δεν είναι ακριβώς σταθερά.

Εκπεμπόμενη Ενέργεια

Δέχομαι το νόμο Stefan-Boltzmann

$\mathbf{E_{out} = \sigma*T_E^2*4\pi R_E^2}$

Απορροφούμενη Ενέργεια

-στην προσπίπτουσα:

Η ατμόσφαιρα απορροφά ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας στο ορατό-υπεριώδες

$$\mathbf{E^{\nu}_{abs} = \sigma*T_E^4*4\pi R_E^2*\alpha_\nu}$$
$$\mathbf{= S*(1-A)*\pi*R_E^2*\alpha_\nu}$$

-στην εκπεμπόμενη

Η ατμόσφαιρα απορροφάει στο υπέρυθρο.

$\mathbf{E^{IR}_{abs} = S*T_E^4*4\pi*R_E^2*\alpha_{IR}}$

ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΙΣΟΖΥΓΙΩΝ

Στο ύψος της ατμόσφαιρας:

$\mathbf{S*(1-A)*\pi*R_E^2*(1-\alpha_\nu) + E_{\alpha\tau\mu} = \sigma*T_E^4*4\pi R^2}$ **(1)**

Στην επιφάνεια της Γης:

$\mathbf{S*(1-A)*\pi*R_E^2 = E_{\alpha\tau\mu} + \sigma*T_E^4*4\pi R^2 * (1- \alpha_{IR})}$ **(2)**

Από τις σχέσεις (1) και (2) καταλήγω στην τελική μου εξίσωση:

$$\boxed{T_E^{\ 4} = \frac{S*(1-A)*(2-a_\nu)}{4*\sigma*(2-a_{IR})}}$$

όπου T: Μέση θερμοκρασία του πλανήτη (K)

S: Ηλιακή ακτινοβολία (Solar Irradiance) (W/m^2)

A: Σταθερά Albeldo (earth's albeldo)

σ: Σταθερά Stefan Boltzmann (W/m^2K^4)

α_v: Συντελεστής Απορροφητικότητας της ατμόσφαιρας στο υπεριώδες τμήμα

α_{IR}: Συντελεστής Απορροφητικότητας της ατμόσφαιρας στο υπέρυθρο

Σαν μία πρώτη προσέγγιση, πήραμε τιμές ηλιακής ακτινοβολίας (solar irradiance, S) από το NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) για τη χρονική περίοδο 1978-2003, και τοποθετώντας μέσες τιμές για τα υπόλοιπα μεγέθη μας. Τις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας, επειδή ήταν ημερήσιες, τις κανονικοποιήσαμε, μετατρέποντάς τες σε ετήσιες. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω. Το μοντέλο έτρεξε με σχετικό σφάλμα 1%.

S (W/m^2)	Year
1365.824815	1978
1366.553666	1979
1366.544938	1980
1366.597314	1981
1366.310726	1982
1366.144496	1983
1365.735655	1984
1365.548488	1985
1365.538232	1986
1365.633703	1987
1365.959484	1988
1366.397114	1989
1366.34998	1990
1366.262711	1991
1366.079727	1992
1365.777747	1993
1365.612084	1994
1365.518003	1995
1365.432385	1996
1365.582888	1997
1365.879657	1998
1366.082614	1999
1366.291813	2000
1366.237386	2001
1366.300535	2002
1365.948922	2003

Για $\alpha_v = 0,02$

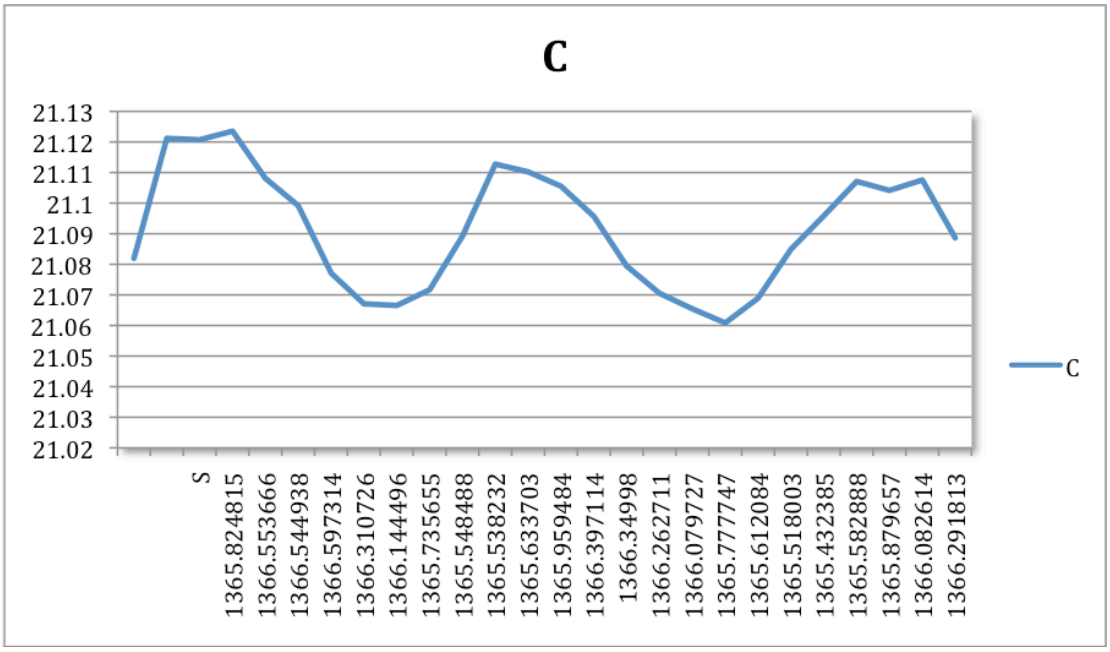
$\alpha_{IR} = 0,9$

$\sigma = 5,67*10^{-8}\ W/m^2K^4$

$A = 0,31$

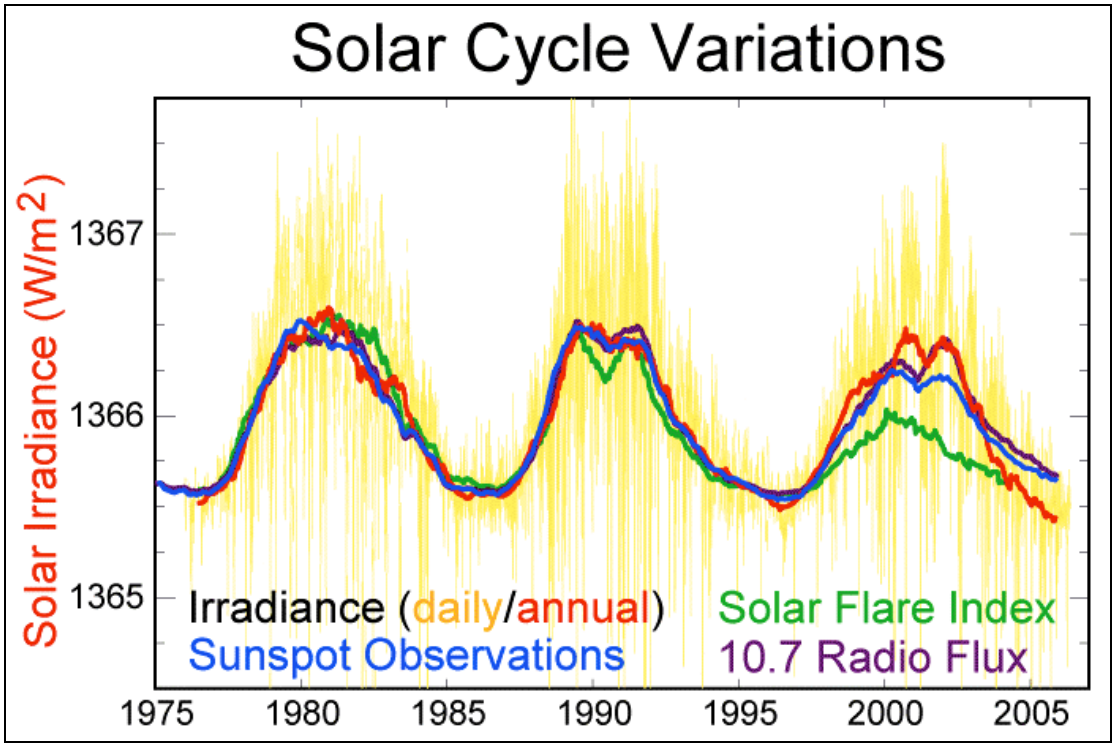
Και μετατρέποντας τους βαθμούς Kelvin σε βαθμούς Κελσίου, πήραμε τα εξής αποτελέσματα:

S (W/m²)	T (°C)
1365.824815	21.08196129
1366.553666	21.12118652
1366.544938	21.12071686
1366.597314	21.12353506
1366.310726	21.10811373
1366.144496	21.09916778
1365.735655	21.07716185
1365.548488	21.06708586
1365.538232	21.06653375
1365.633703	21.07167347
1365.959484	21.08921009
1366.397114	21.11276256
1366.34998	21.11022614
1366.262711	21.10552984
1366.079727	21.09568192
1365.777747	21.07942768
1365.612084	21.07050963
1365.518003	21.06544467
1365.432385	21.06083508
1365.582888	21.06893783
1365.879657	21.08491334
1366.082614	21.0958373
1366.291813	21.10709598
1366.237386	21.10416693
1366.300535	21.10756532
1365.948922	21.08864158



Σχήμα 4.1: S vs T

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της πρώτης προσέγγισής μας, διακρίνουμε μία ελάχιστη μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη, από τις εναλλαγές της ηλιακής ακτινοβολίας, κάτι που παρατηρείται και στα περισσότερα μοντέλα μελέτης του κλίματος. Αυτό συμβαίνει, γιατί σε αυτά τα μοντέλα, αλλά και στη δικιά μας πρώτη προσέγγιση οι τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας είναι κανονικοποιημένοι μέσοι όροι (συνήθως μέσες ετήσιες τιμές). Μελετώντας όμως τις ημερήσιες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας παρατηρούμε ένα μεγάλο εύρος, όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα με τις κίτρινες γραμμές.

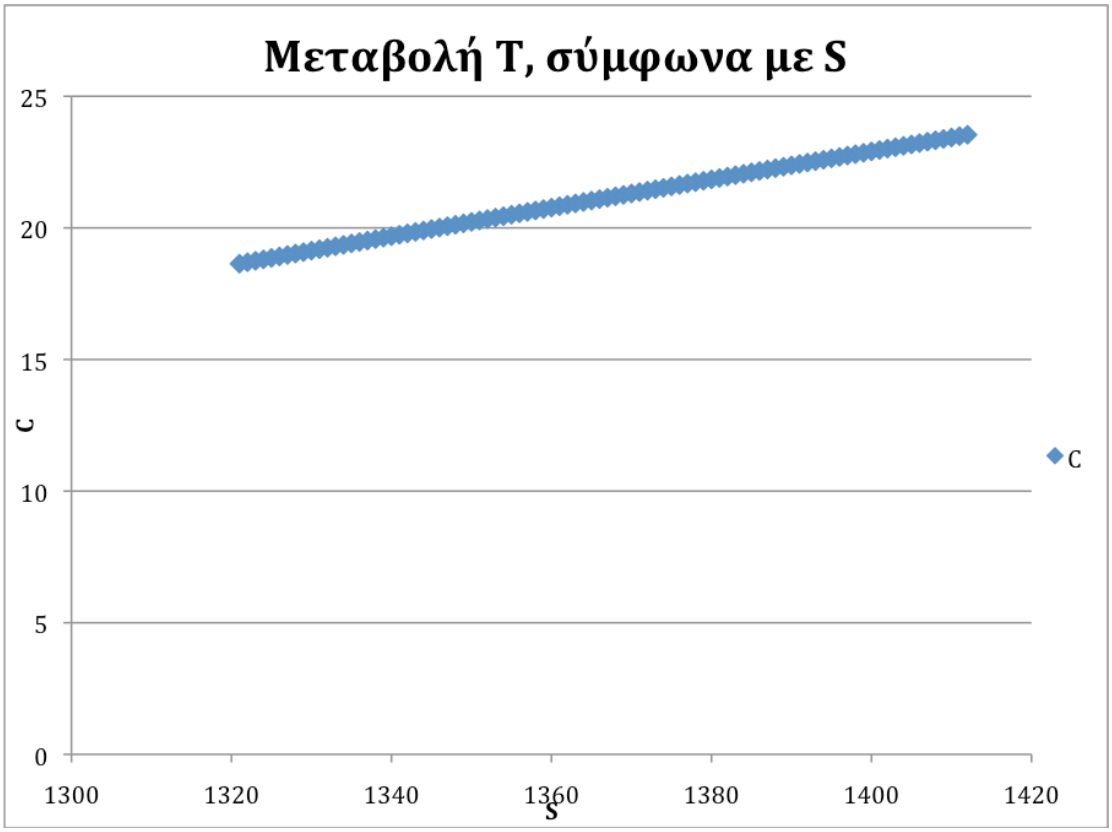


Σχήμα 4.2: Παραλλαγές του ηλιακού κύκλου

Η πραγματική άμεση ηλιακή ακτινοβολία στην κορυφή της ατμόσφαιρας κυμαίνεται κατά περίπου 6,9% κατά τη διάρκεια ενός έτους (από 1.412 W / m^2 στις αρχές Ιανουαρίου έως 1.321 W / m^2 στις αρχές Ιουλίου), για το λόγο της μη σταθερής απόσατσης μεταξύ Ηλίου και Γης.

Στη δεύτερη και τελική μας προσέγγιση, θα λάβουμε υπόψιν μας σε πρώτη φάση, την ετήσια μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας (S), από 1.321 W/m^2, αυξάνοντας κατά 1 W/m^2 μέχρι τα 1.412 W/m^2, παρατηρώντας τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Σύμφωνα με το νόμο του Kirchoff, για ένα μέλαν σώμα, το ποσοστό της υπέρυθρης ακτινοβολίας που ανακλάται είναι 90%, και αφού εμείς έχουμε θεωρήσει τον πλανήτη Γη σαν μέλαν σώμα, λαμβάνουμε το συντελεστή α_{IR} = 0,9, και τις υπόλοιπες μέσες τιμές όπως και προηγουμένως. Έτσι τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω.

S (W/m²)	T (°C)	S (W/m²)	T (°C)
1321	18.63882567	1367	21.14519952
1322	18.69400282	1368	21.1989787
1323	18.74914868	1369	21.2527284
1324	18.80426328	1370	21.30644866
1325	18.85934668	1371	21.36013952
1326	18.9143989	1372	21.41380102
1327	18.96941999	1373	21.46743319
1328	19.02441	1374	21.52103608
1329	19.07936896	1375	21.57460971
1330	19.13429691	1376	21.62815413
1331	19.18919389	1377	21.68166937
1332	19.24405995	1378	21.73515547
1333	19.29889513	1379	21.78861247
1334	19.35369946	1380	21.84204041
1335	19.40847299	1381	21.89543931
1336	19.46321576	1382	21.94880923
1337	19.5179278	1383	22.00215018
1338	19.57260916	1384	22.05546222
1339	19.62725988	1385	22.10874538
1340	19.68188	1386	22.16199969
1341	19.73646955	1387	22.21522519
1342	19.79102858	1388	22.26842191
1343	19.84555713	1389	22.3215899
1344	19.90005524	1390	22.37472919
1345	19.95452294	1391	22.42783982
1346	20.00896028	1392	22.48092181
1347	20.06336729	1393	22.53397522
1348	20.11774402	1394	22.58700007
1349	20.1720905	1395	22.63999639
1350	20.22640678	1396	22.69296423
1351	20.28069289	1397	22.74590363
1352	20.33494887	1398	22.79881461
1353	20.38917476	1399	22.85169721
1354	20.4433706	1400	22.90455146
1355	20.49753643	1401	22.95737741
1356	20.55167229	1402	23.01017509
1357	20.60577821	1403	23.06294454
1358	20.65985424	1404	23.11568578
1359	20.71390041	1405	23.16839885
1360	20.76791676	1406	23.2210838
1361	20.82190333	1407	23.27374064
1362	20.87586016	1408	23.32636943
1363	20.92978729	1409	23.37897019
1364	20.98368475	1410	23.43154296
1365	21.03755258	1411	23.48408777
1366	21.09139083	1412	23.53660466



Σχήμα 4.3: S vs T

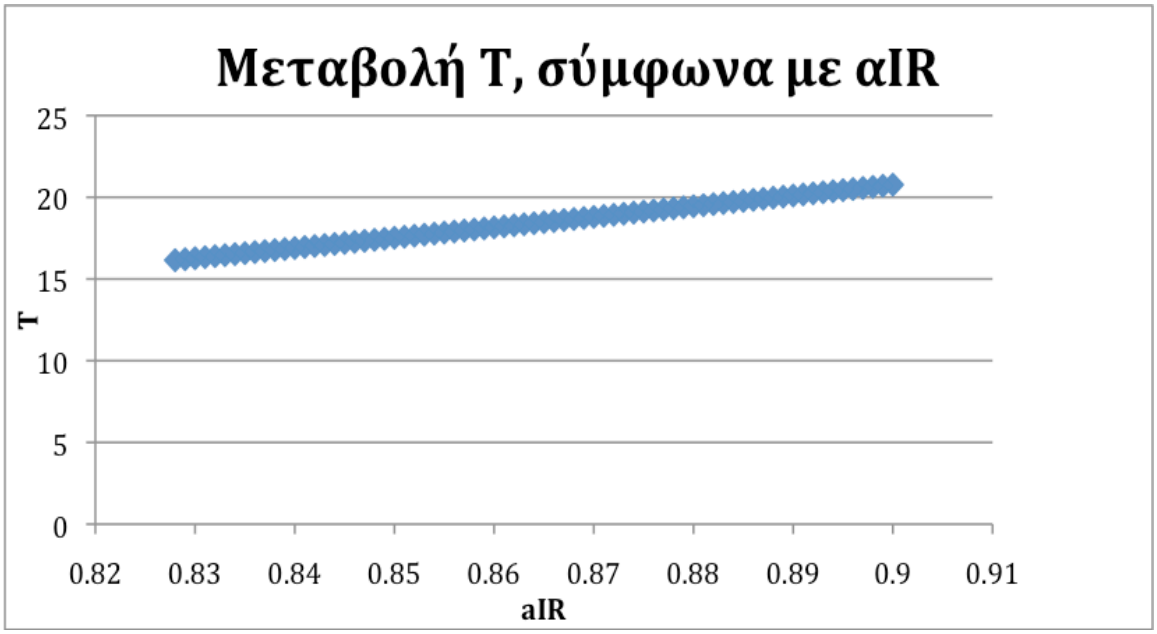
Από τα αποτελέσματα αυτά, παρατηρείται ότι από το minimum της ηλιακής ακτινοβολίας (1.321 W/m^2), μέχρι το maximum (1.412 W/m^2) κατά τη διάρκεια ενός έτος, υπάρχει μια διακύμανση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη της τάξεως των 4,9^{o}C.

Σε δεύτερη φάση, θέλουμε να πάρουμε ένα εύρος τιμών για το συντελεστή α_{IR}, εξετάζοντας την επιρροή του διοξειδίου του άνθρακα σε αυτό, κρατώντας σταθερό τον παράγοντα ηλιακή ακτινοβολία (S), παίρνοντας μια μέση τιμή 1.360 W/m^2. Όπως είπαμε και παραπάνω, σύμφωνα με το νόμο του Kirchoff, για ένα μέλαν σώμα έχουμε α_{IR} = 0,9, τιμή η οποία είναι και η μέγιστη που μπορούμε να πάρουμε.

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) είναι ένα από τα αέρια θερμοκηπίου και μετά τον υδρατμό, είναι ο σημαντικότερος απορροφητής της ακτινοβολίας που (επαν)εκπέμπει το γήινο έδαφος. Το διοξείδιο του άνθρακα απορροφά υπέρυθρη ακτινοβολία (IR) σε τρεις στενές ζώνες των μηκών κύματος, που είναι 2,7, 4,3 και 15 μικρόμετρα (μm). Αυτό σημαίνει ότι το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας που παράγεται και διαδίδεται μέσω ακτινοβολίας διαφεύγει. Έτσι από το φασματογράφημα του CO_2, μόνο ένα 8% της ακτινοβολίας που (επαν)εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα μπορεί να απορροφηθεί παραπάνω.
Επομένως η επιρροή του CO_2 στο συντελεστή α_{IR} θα είναι της τάξεως του 0,08*0,9 = 0,072. Έτσι αφού το 0,9 είναι η maximum τιμή που μπορούμε να πάρουμε, για ένα μέλαν σώμα, για το συντελεστή α_{IR}, παίρνουμε ένα εύρος τιμών

0,828 – 0,9, για να παρατηρήσουμε τη διακύμανση της θερμοκρασίας, συνυπολογίζοντας τον παράγοντα CO_2. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

α_{IR}	T (°C)	α_{IR}	T (°C)
0.828	16.1482924	0.865	18.47651574
0.829	16.2100037	0.866	18.54075299
0.83	16.27178091	0.867	18.60506109
0.831	16.33362416	0.868	18.66944018
0.832	16.39553358	0.869	18.7338904
0.833	16.45750928	0.87	18.79841189
0.834	16.5195514	0.871	18.86300479
0.835	16.58166007	0.872	18.92766924
0.836	16.64383542	0.873	18.9924054
0.837	16.70607757	0.874	19.05721339
0.838	16.76838666	0.875	19.12209337
0.839	16.83076281	0.876	19.18704548
0.84	16.89320615	0.877	19.25206987
0.841	16.95571682	0.878	19.31716667
0.842	17.01829494	0.879	19.38233603
0.843	17.08094065	0.88	19.44757811
0.844	17.14365408	0.881	19.51289303
0.845	17.20643536	0.882	19.57828097
0.846	17.26928461	0.883	19.64374205
0.847	17.33220199	0.884	19.70927642
0.848	17.39518761	0.885	19.77488425
0.849	17.45824161	0.886	19.84056566
0.85	17.52136413	0.887	19.90632081
0.851	17.58455529	0.888	19.97214986
0.852	17.64781524	0.889	20.03805295
0.853	17.71114411	0.89	20.10403022
0.854	17.77454203	0.891	20.17008184
0.855	17.83800913	0.892	20.23620795
0.856	17.90154557	0.893	20.3024087
0.857	17.96515146	0.894	20.36868424
0.858	18.02882696	0.895	20.43503474
0.859	18.09257219	0.896	20.50146033
0.86	18.15638729	0.897	20.56796117
0.861	18.2202724	0.898	20.63453742
0.862	18.28422767	0.899	20.70118924
0.863	18.34825322	0.9	20.76791676
0.864	18.4123492		



Σχήμα 4.4: a_{IR} vs T

Από τα αποτελέσματα αυτά, παρατηρείται ότι από το minimum του συντελεστή α_{IR} (0,828), μέχρι το maximum (0,9) ανεξαρτήτως χρονικού περιορισμού, υπάρχει μια διακύμανση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη της τάξεως των 4,6^{o}C.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

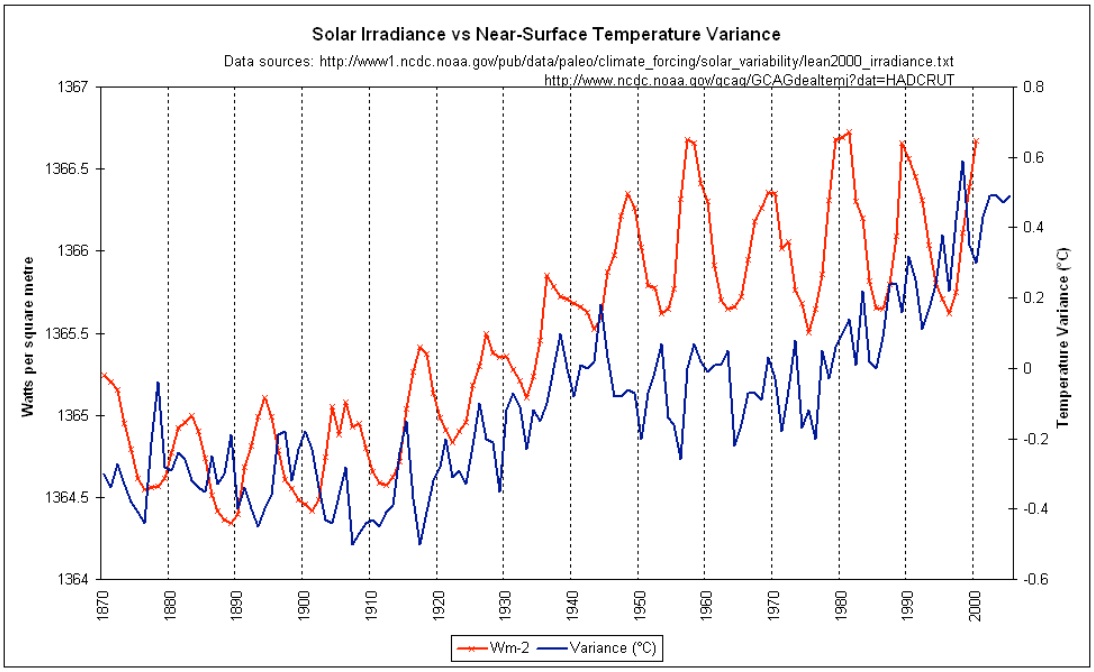
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη βιβλιογραφία και την έρευνα που έχουμε κάνει γνωρίζουμε ότι υπάρχουν κλιματικά μοντέλα, τα οποία στο μεγαλύτερό τους μέρος, είτε χρησιμοποιούνε πολύπλοκες στατιστικές αναλύσεις, είτε προσεγγίζουν χαοτικά το πρόβλημα (μέθοδος Monte Carlo). Εμάς μας ενδιαφέρει να διερευνήσουμε τις σχέσεις συνάφειας μεταξύ των μεγεθών που εξετάζουμε. Εξετάζοντας πιο μακροσκοπικά και όχι με πολύ μεγάλη αριθμητική λεπτομέρεια το πρόβλημα, προσπαθούμε να βρούμε τις σχέσεις αιτίου αιτιατού μεταξύ των μεγεθών 'Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας' και 'απορροφητικότητα ατμόσφαιρας στο υπέρυθρο'καθώς και το αποτέλεσμα της συναγωγής τους που είναι η μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας της Γης.

Από τα αποτελέσματα του μοντέλου μας στη δεύτερη προσέγγιση, παρατηρούμε ότι οι εναλλαγές τις ηλιακής ακτινοβολίας (solar irradiance) κατά τη διάρκεια ενός έτους, μπορούν να προκαλέσουν στη μέση θερμοκρασία της Γης, μια μεταβολή της τάξεως των 4,9 ^{o}C, ενώ οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, προκαλούν γενικά μια μεταβολή της τάξεως των 4,6 ^{o}C.

Από το συγκεκριμένο μοντέλο, λόγω των μέσων που διαθέταμε και των παραδοχών του, δεν μπορούμε να πούμε με σιγουριά αν το μέγεθος S (solar irradiance) ή αν το μέγεθος α_{IR} (απορροφητικότητα ατμόσφαιρας υπέρυθρο) είναι η το κύριο αίτιο της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Αυτό ίσως να οδηγούσε σε εσφαλμένα συμπεράσματα.

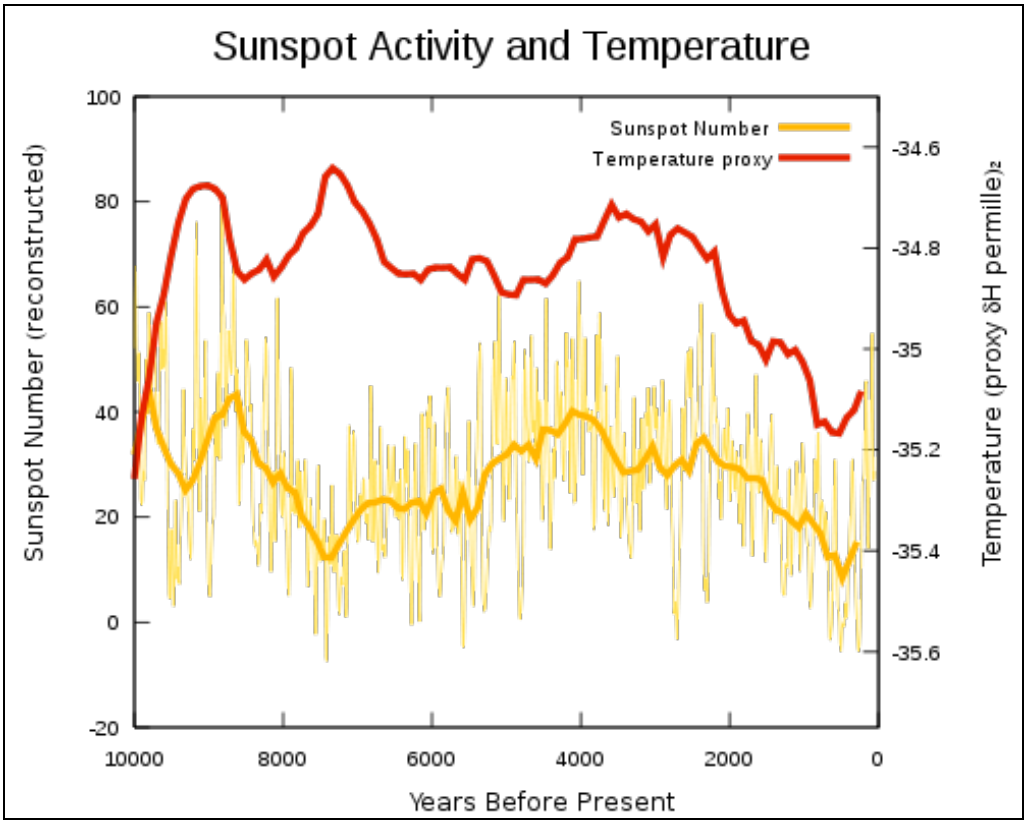
Ένα πράγμα όμως που μπορούμε να παρατηρήσουμε με αρκετή σιγουριά, είναι το γεγονός ότι η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας δεν είναι σταθερή. Και όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα έχει μία άμεση σχέχη με τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Η κόκκινη γραμμή παριστάνει την ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας και η μπλε τη μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας.



Σχήμα 5.1: Συσχέτιση των διακυμάνσεων της ηλιακής δραστηριότητας και της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της Γης για τα έτη 1870-2000.

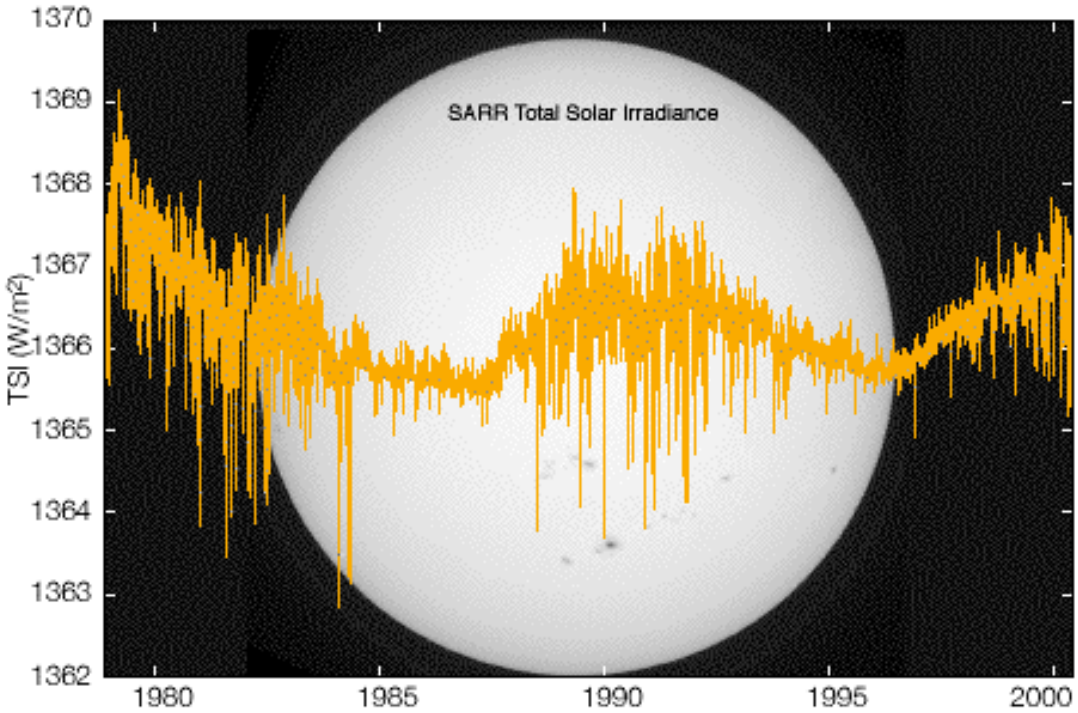
Επίσης φαινόμενα του παρελθόντος όπως πολύ θερμές ή πολύ ψυχρές περίοδοι(παγετώνες) εξηγούνται με τις διακυμάνσεις της ηλιακής ακτινοβολίας. Κατά τον *Ernst Julius Öpik*, η παγετώδης περίοδος, που παρατηρήθηκε πριν από 500 εκατομμύρια χρόνια, πρέπει να οφείλεται σε μια πρόσκαιρη αλλαγή του Ηλιου που το σημαντικό στοιχείο αυτής της αλλαγής ήταν η μείωση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, επειδή ένα μέρος αυτής δαπανήθηκε για τη σύνθεση βαρύτερων στοιχείων (άνθρακα, αζώτου, οξυγόνου, κλπ).

Μία θεωρία που εξηγεί αυτές τις διακυμάνσεις είναι η θεωρία των ηλιακών κηλίδων, που προαναφέρθηκε στο 3ο κεφάλαιο. Παρατηρώντας το παρακάτω διάγραμμα, μπορούμε να δούμε ότι ιδιαίτερα τα τελευταία 4.000 χρόνια υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ του αριθμού των ηλιακών κηλίδων και της θερμοκρασίας.



Σχήμα 5.2: Συσχέτιση των διακυμάνσεων του αριθμού των ηλιακών κηλίδων και της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της Γης για τα τελευταία 10000 έτη.

Έτσι λοιπόν, παρακολουθώντας τα αποτελέσματα του μοντέλου μας και σχετίζοντας τα με τα παραπάνω διαγράμματα και θεωρίες, και ιδιαίτερα με το παρακάτω διάγραμμα, θα μπορούσαμε να προβλέψουμε το εξής: αυτή την περίοδο, βρισκόμαστε αν όχι πάνω, κοντά σε ένα μέγιστο της ηλιακής δραστηριότητας. Σύμφωνα λοιπόν και με τον 11-ετή κύκλο του Ηλίου, θα μπορούσαμε τα επόμενα χρόνια να αναμένουμε μια σχετική πτώση της μέσης θερμοκρασίας της Γης, ακόμα και αν δε μειωθούν ραγδαία οι συγκεντρώσεις του CO_2. Να θυμήθουμε εδώ ότι μια αντίστοιχη τέτοια περίοδος, δηλαδή με πτώση θερμοκρασίας και αύξηση του CO_2 από τον ανθρώπινο παράγοντα, έλαβε χώρα την 25ετία 1940-1975, κατά τη διάρκεια δηλαδή της μεταπολεμικής βιομηχανικής έκρηξης.



Σχήμα 5.3 Διακύμανση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας τα έτη 1980-2000

Αυτή η διπλωματική εργασία, δεν έχει σαν στόχο ούτε να αμφισβητήσει τις θεωρίες και τα κλιματικά μοντέλα που ήδη υπάρχουν, καθώς ούτε να πάρει και συγκεκριμένη θέση για το αν το CO_2 κάνει καλό ή κακό στο κλίμα και στο περιβάλλον, και πόσο μάλλον να εξυπηρετήσει κάποια πολιτική σκοπιμότητα. Απλά δείχνοντας τις επιρροές των εναλλαγών της ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας στη μέση θερμοκρασία του πλανήτη, αποδεικνύει ότι το S είναι ένα μέγεθος, το οποίο δεν πρέπει να εκλαμβάνεται σαν σταθερό.
Το ζήτημα της υπερθέρμανσης της Γης, είναι πολύ σημαντικό, επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τον πλανήτη μας και έχει πάρει και τεράστιες κοινωνικές και πολιτικές προεκτάσεις. Για αυτούς τους πολύ σημαντικούς λόγους, η επιστήμη πρέπει να συμβάλει στη μελέτη και στην πρόγνωση αυτού του φαινομένου, εξετάζοντας όλα τα νέα δεδομένα που προκύπτουν, χωρίς σκοπιμότητες. Να δημιουργηθούν ουσιαστικά μοντέλα πρόγνωσης και όχι μοντέλα εντυπωσιασμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Χ.Σ.Σαχσαμάνογλου, Α.Α.Μπλούτσος,"**Φυσική Κλιματολογία**", 1998

Μ.Λαζαρίδης, "**Ατμοσφαιρική ρύπανση με στοιχεία Μετεωρολογίας**", 2005

Π. Κατσαφάδος, Η. Μαυροματίδης, "**Αρχές Μετεωρολογίας-Κλιματολογίας**", 2010

W. Zdunkowski, A. Bott, T. Trautmann, "**RADIATION IN THE ATMOSPHERE A Course in Theoretical Meteorology**", 2007

Sen Zekai, "**Solar energy fundamentals and modeling techniques : atmosphere, environment, climate change and renewable energy**", 2008

R. A. Hanel, B. J. Conrath, D. E. Jennings, R. E. Samuelson, "**EXPLORATION OF THE SOLAR SYSTEM BY INFRARED REMOTE SENSING**", 2003

ΠΗΓΕΣ

www.wikipedia.org
http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_radiation
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Solar-cycle-data.png
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Sunspot_Numbers.png

CO_2 ABSORPTION SPECTRUM
http://nov55.com/ntyg.html

Μετρήσεις Solar Irradiance

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION
www.noaa.gov
ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_IRRADIANCE/composite_d25_07_0310a.dat