



Κλίμα και κλιματική αλλαγή

Θοδωρής Μ. Γιάνναρος

Συνεργαζόμενος Ερευνητής

Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών

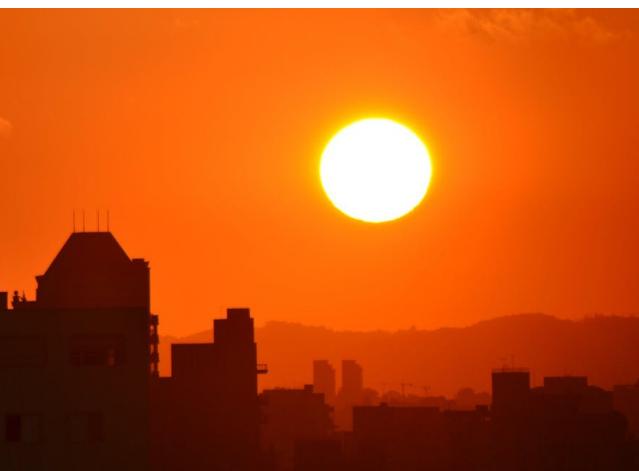
Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος & Βιώσιμης Ανάπτυξης

Email: thgian@noa.gr

Μία σκληρή αλήθεια

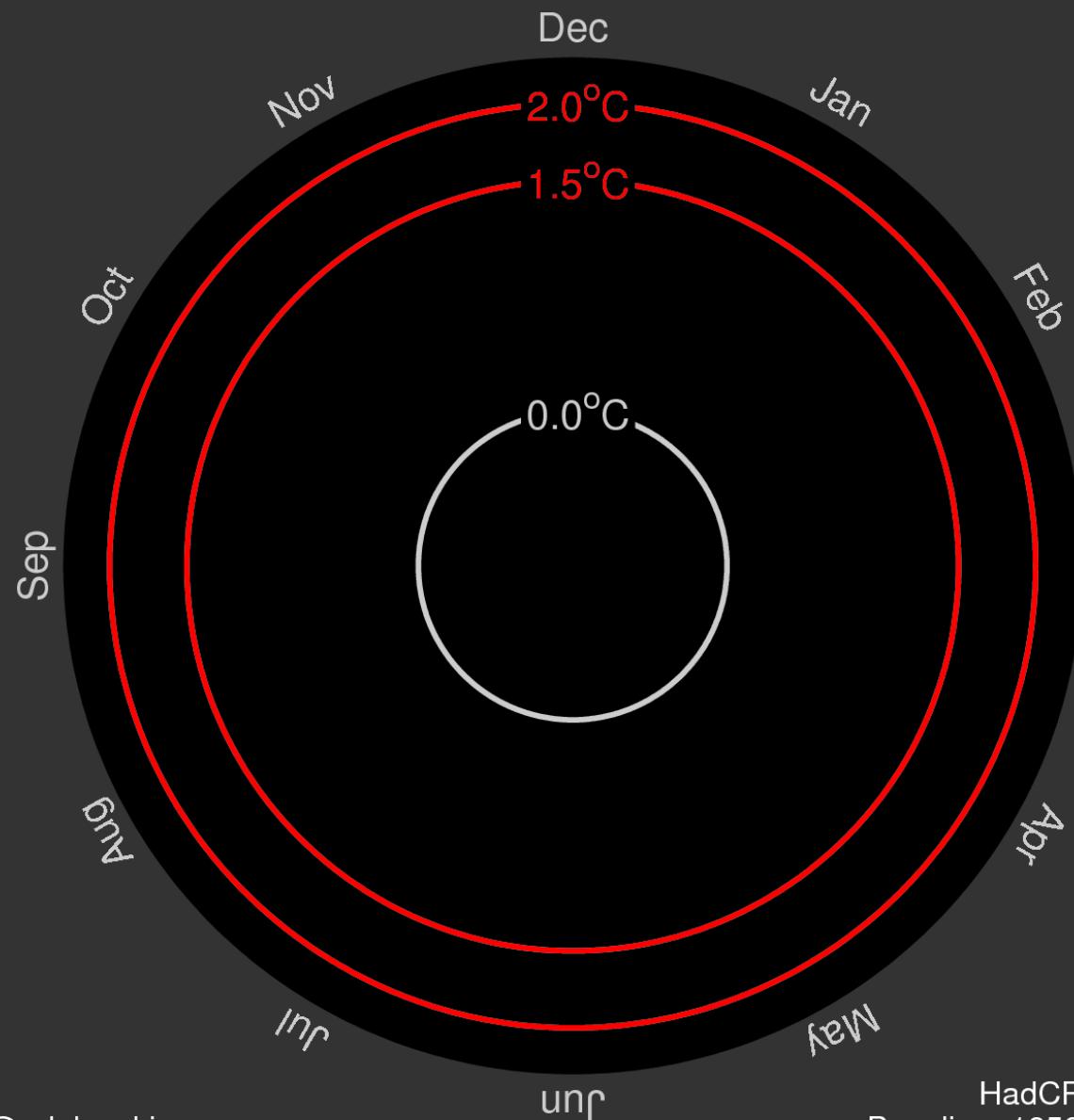


“Η κλιματική αλλαγή δεν αποτελεί πια ένα μακρινό πρόβλημα. Συμβαίνει **εδώ**. Συμβαίνει **τώρα**”. Μπαράκ Ομπάμα, Πρόεδρος των ΗΠΑ.



Ένα αδιαμφισβήτητο γεγονός

Global temperature change (1850–2017)



Μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας της Γης από το 1850 μέχρι το 2017, συγκριτικά με την περίοδο 1850 - 1900.

Δομή και στόχοι μαθήματος

Ενότητα 1: Εισαγωγή στο κλιματικό σύστημα

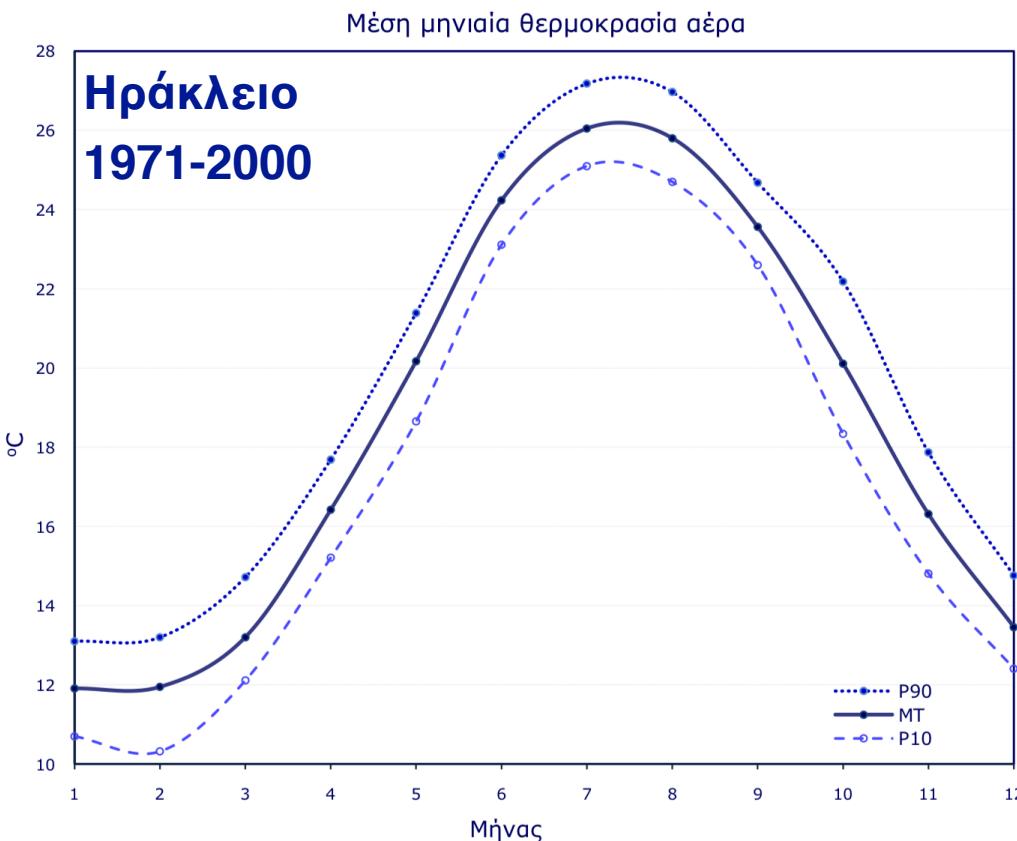
- Βασικές **έννοιες** και **ορισμοί**
- **Γενική επισκόπηση** του κλιματικού συστήματος
- Η **ατμόσφαιρα** της Γης
- Ακτινοβολία: η **κινητήριος δύναμη** του κλιματικού συστήματος
- Το φαινόμενο του **Θερμοκηπίου**
- Το **ενεργειακό ισοζύγιο** Γης-Ατμόσφαιρας
- Η **γενική κυκλοφορία** της ατμόσφαιρας
- Άλλοι **παράγοντες καθορισμού** του κλίματος
- Η **γεωγραφία** του κλίματος σε παγκόσμια κλίμακα

1.1 Βασικές έννοιες και ορισμοί

[1]

Κλίμα: Η **μέση κατάσταση της ατμόσφαιρας** σε μία ορισμένη **χρονική κλίμακα** (μήνας, έτος, δεκαετία, κ.ο.κ.) και, συνήθως, για μία ορισμένη **γεωγραφική περιοχή**.

Για την **περιγραφή του κλίματος** χρησιμοποιούνται, συνηθέστερα, οι ακόλουθες μεταβλητές: **(1) θερμοκρασία, (2) υετός (ποσότητα, είδος), (3) άνεμος (ταχύτητα, διεύθυνση), (4) υγρασία, (5) νεφοκάλυψη/ηλιοφάνεια, (6) πίεση, και (7) ορατότητα.**



	MxT	P90	MT	P10	MnT
ΙΑΝ	13.5	13.1	11.9	10.7	10.5
ΦΕΒ	14.5	13.2	11.9	10.3	9.8
ΜΑΡ	15.1	14.7	13.2	12.1	10.2
ΑΠΡ	18.2	17.7	16.4	15.2	13.7
ΜΑΙ	21.9	21.4	20.2	18.7	18.5
ΙΟΥΝ	25.9	25.4	24.2	23.1	22.8
ΙΟΥΛ	27.7	27.2	26.0	25.1	24.5
ΑΥΓ	27.6	27.0	25.8	24.7	24.5
ΣΕΠ	25.3	24.7	23.6	22.6	21.9
ΟΚΤ	22.6	22.2	20.1	18.3	17.8
ΝΟΕ	18.3	17.9	16.3	14.8	14.4
ΔΕΚ	15.3	14.8	13.5	12.4	10.5

P10: 10° εκατοστημόριο
P90: 90° εκατοστημόριο
MxT: μεγαλύτερη μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα
MnT: μικρότερη μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα
MT: μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα

1.1 Βασικές έννοιες και ορισμοί

[2]

Διαχωρισμός καιρού - κλίματος

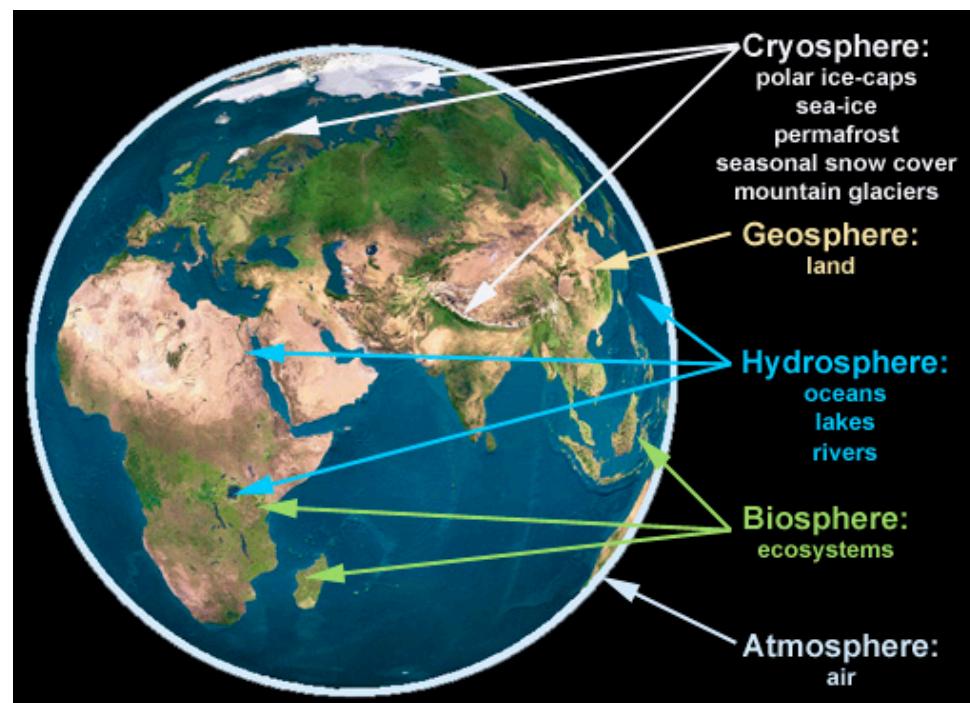
Ο **καιρός** περιγράφει την κατάσταση της ατμόσφαιρας μια **ορισμένη χρονική στιγμή**, σε μια **ορισμένη γεωγραφική περιοχή**. Υπό αυτό το πρίσμα, το **κλίμα** μπορεί να θεωρηθεί ως ο “**μέσος καιρός**”.



Με βάση τα κλιματικά δεδομένα, ο **μέσος μηνιαίος υετός** του **Σεπτεμβρίου**, στο Ηράκλειο, είναι **17.7 mm**. Ωστόσο, το περασμένο στο Σεπτέμβριο, ο υετός που **καταγράφηκε** στο Ηράκλειο ήταν **9.6 mm**.

1.1 Βασικές έννοιες και ορισμοί

[3]



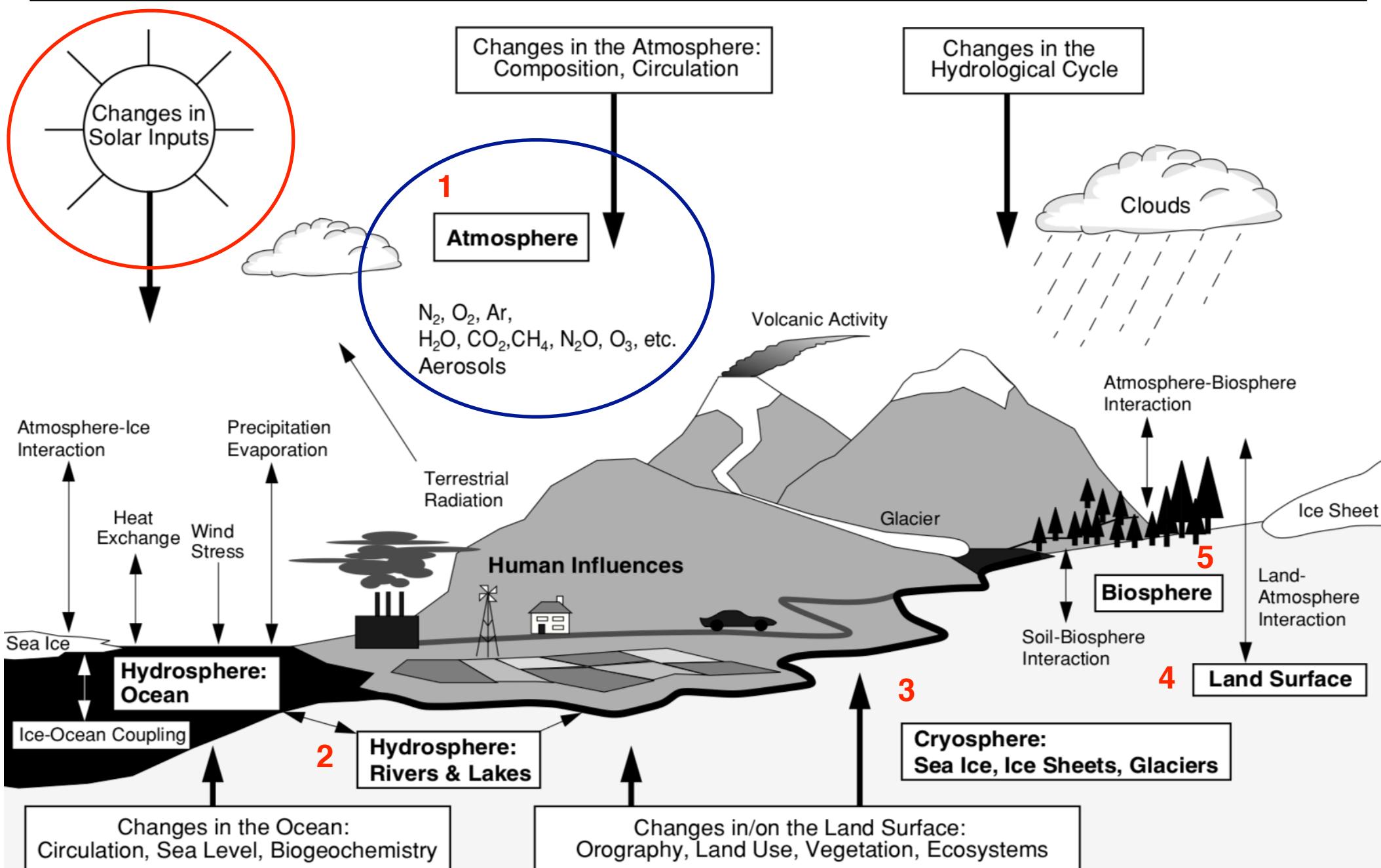
Κλιματικό σύστημα: Ένα γεωφυσικό σύστημα αποτελούμενο από 5 “**συνιστώσες**”, οι **αλληλεπιδράσεις** των οποίων καθορίζουν το κλίμα.

- Ατμόσφαιρα
- Υγρόσφαιρα
- Κρυόσφαιρα
- Βιόσφαιρα
- Λιθόσφαιρα ή γεώσφαιρα

Κλιματική αλλαγή: Οποιαδήποτε **αλλαγή** στο κλίμα, η οποία μπορεί να αποδοθεί **άμεσα** ή **έμμεσα** στην **ανθρώπινη δραστηριότητα**.



1.2 Γενική επισκόπηση του κλιματικού συστήματος



1.3 Η ατμόσφαιρα της Γης

[1]



Ατμόσφαιρα: Ένα **λεπτό στρώμα αερίων** το οποίο περιβάλλει τον πλανήτη.

Σύσταση: **Σταθερά** και **μεταβλητά** αέρια.

- **Σταθερά** αέρια: **N₂** (78%), **O₂** (21%), **Ar** (1%), Ne, He, H₂, Xe (ιχνοστοιχεία).

Χαρακτηρίζονται “σταθερά” λόγω της **μη μεταβλητότητας** των συγκεντρώσεων τους, χάρη στην **ισορροπία** μεταξύ των **πηγών** και των **καταβοθρών** τους.

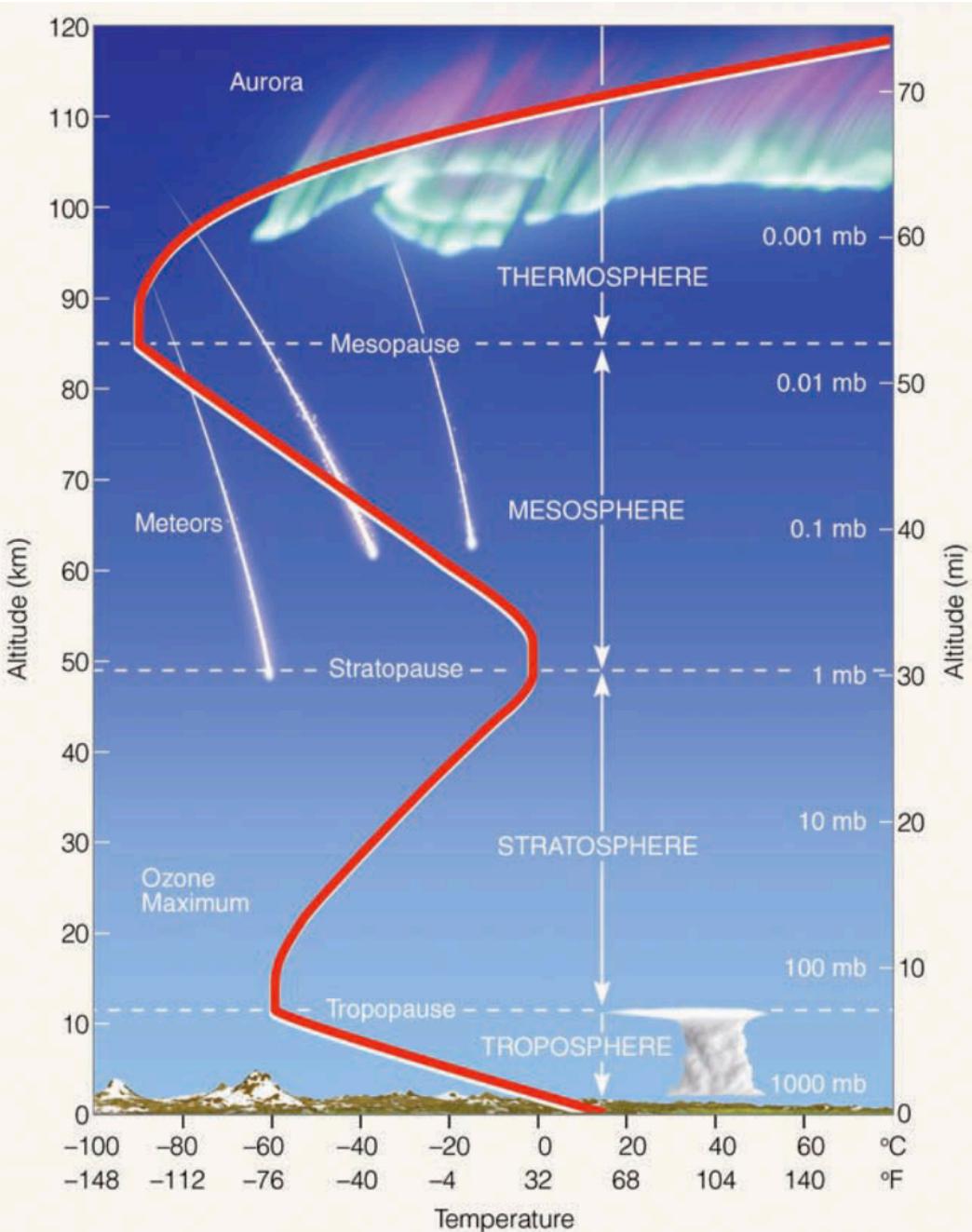
- **Μεταβλητά** αέρια: **H₂O** (0-4%), **CO₂**, **CH₄**, **N₂O**, **O₃**.

Χαρακτηρίζονται “μεταβλητά” λόγω της **μεταβολής** των συγκεντρώσεων τους, τόσο **χωρικά** όσο και **χρονικά**.

Η ατμόσφαιρα έχει κεντρικό ρόλο στη λειτουργία του κλιματικού συστήματος. Αποτελεί εκείνη τη συνιστώσα που αλληλεπιδρώντας τις υπόλοιπες 4, καθορίζει τελικά το κλίμα, σε παγκόσμια και περιοχική κλίμακα.

1.3 Η ατμόσφαιρα της Γης

[2]



Η ατμόσφαιρα της Γης είναι **στρωματοποιημένη**, οπότε διακρίνουμε **4 βασικά στρώματα**:

1. Τροπόσφαιρα ($\Delta T/\Delta z < 0$)

Αποτελεί το στρώμα εκείνο όπου δημιουργείται ο καιρός.

2. Στρατόσφαιρα ($\Delta T/\Delta z > 0$)

Αποτελεί στο στρώμα εκείνο όπου εντοπίζεται το στρώμα του όζοντος.

3. Μεσόσφαιρα ($\Delta T/\Delta z < 0$)

Μόλις το 1% του ατμοσφαιρικού αέρα εντοπίζεται σε αυτό το στρώμα και ψηλότερα.

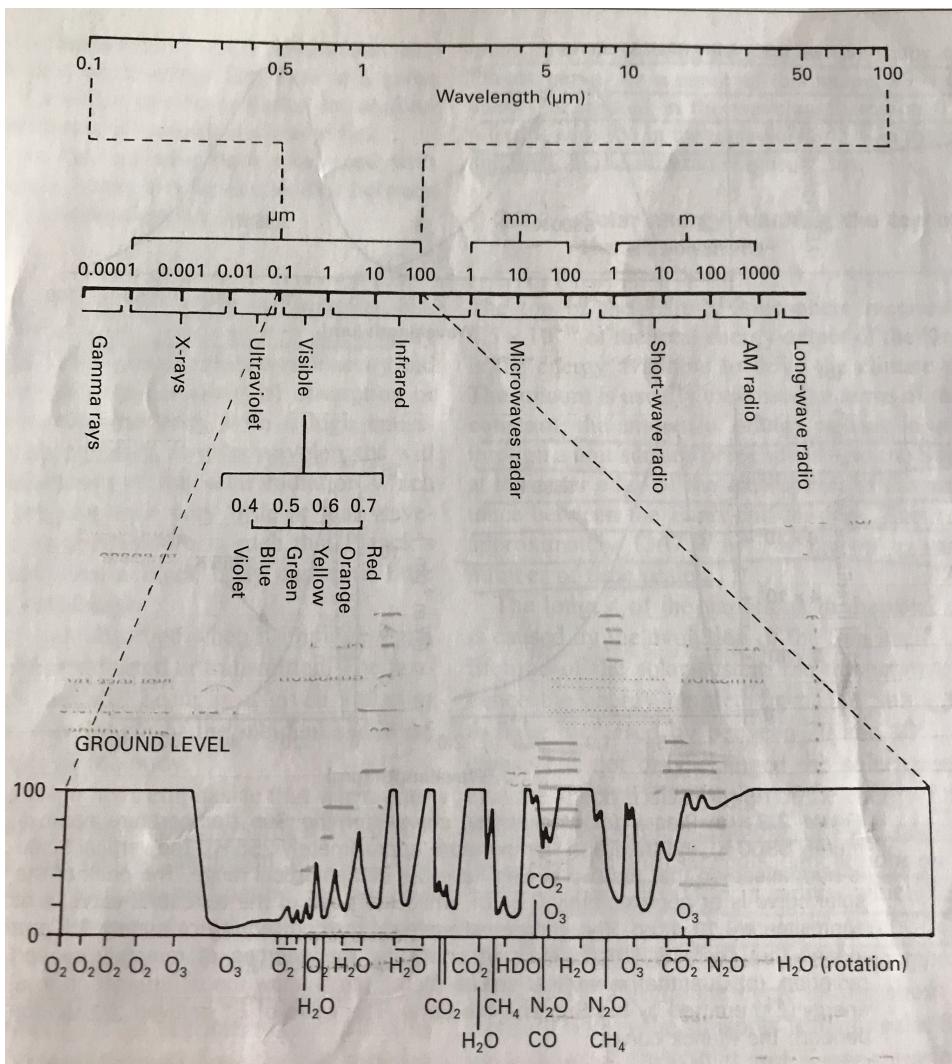
4. Θερμόσφαιρα ($\Delta T/\Delta z > 0$)

Πάνω από τη θερμόσφαιρα, υπάρχει η **εξώσφαιρα**, η οποία εκτείνεται μέχρι τα **~500 km**, ύψος που θεωρείται ως το **ανώτερο όριο** της ατμόσφαιρας της Γης.

1.4 Ακτινοβολία

[1]

Η (ηλεκτρομαγνητική) **ακτινοβολία** αποτελεί **μορφή ενέργειας**, η οποία εκπέμπεται από ένα σώμα όταν η θερμοκρασία του $T > 273.15 \text{ K}$. Αποτελεί τη μοναδική μορφή ενέργειας που μπορεί να μεταδοθεί στο **κενό**, οπότε και είναι η μοναδική “**οδός**” μέσω της οποίας η Γη (και το κλιματικό της σύστημα) **δέχεται** και **αποβάλλει** ενέργεια.



Για το **κλιματικό σύστημα**, μας ενδιαφέρει κύρια η ακτινοβολία μεταξύ **0.1 - 100 μm** :

- $\lambda < 0.4 \text{ } \mu\text{m}$: Υπεριώδης (**UV**)
 - $0.4 < \lambda < 0.7 \text{ } \mu\text{m}$: Ορατό (**VIS**)
 - $\lambda > 0.7 \text{ } \mu\text{m}$: Υπέρυθρη (**IR**)
- η οποία μπορεί επίσης να κατηγοριοποιηθεί ως:
- **Μικρού μήκους κύματος** ($0.2 < \lambda < 4 \text{ } \mu\text{m}$)
 - **Μεγάλου μήκους κύματος** ($4 < \lambda < 60 \text{ } \mu\text{m}$)

1.4 Ακτινοβολία

[2]

Βασικοί νόμοι της ακτινοβολίας

1. Νόμος του Planck

Περιγράφει την **εκπομπή ακτινοβολίας σε διάφορα μ.κ.** του η/μ φάσματος ως συνάρτηση της **Θερμοκρασίας** του σώματος που εκπέμπει την ακτινοβολία.

2. Νόμος του Wien

Περιγράφει το **μ.κ. στο οποίο μεγιστοποιείται η εκπομπή ακτινοβολίας** ως συνάρτηση της **Θερμοκρασίας** του σώματος που εκπέμπει την ακτινοβολία.

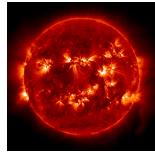
3. Νόμος των Stefan-Boltzmann

Περιγράφει τη **συνολική ενέργεια της ακτινοβολίας** που εκπέμπει ένα σώμα ως συνάρτηση της **Θερμοκρασίας** του.

Οι παραπάνω 3 νόμοι βρίσκουν εφαρμογή για σώματα τα οποία, **Θεωρητικά**, αποτελούν **τέλειους εκπομπούς** ακτινοβολίας (**μελανά σώματα**).

1.4 Ακτινοβολία

[3]

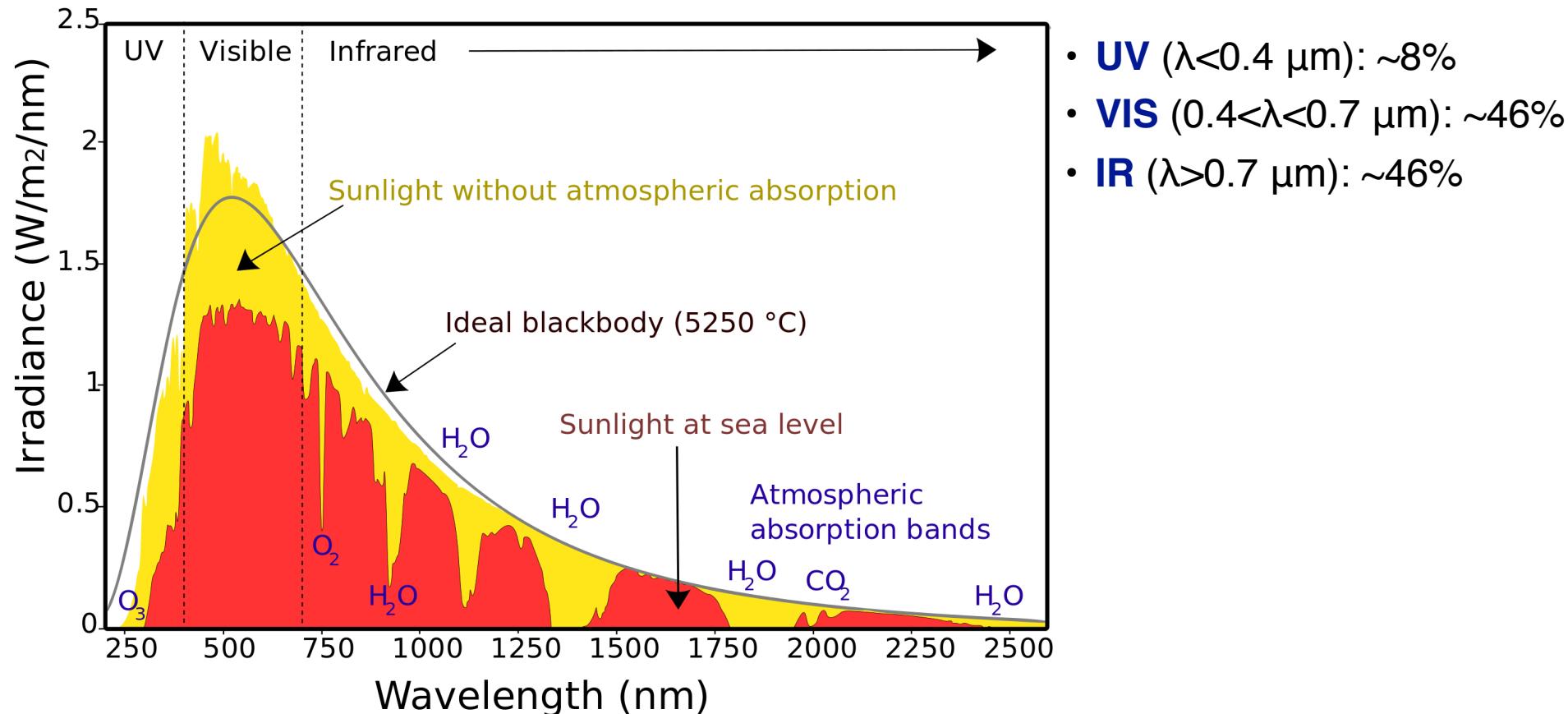


Η **ηλιακή ακτινοβολία** αποτελεί την **κινητήριο δύναμη** του κλιματικού **συστήματος** της Γης.

Θεωρούμε ότι ο **'Ηλιος** ακτινοβολεί ως **μέλαν σώμα** με θερμοκρασία **5250 K**.

Στην **επιφάνεια** της Γης, μας ενδιαφέρει κύρια η ακτινοβολία μεταξύ **0.3 - 1.4 μμ**: **Υπεριώδες** (UV) - **Ορατό** (VIS) - **Υπέρυθρο** (IR).

Spectrum of Solar Radiation (Earth)

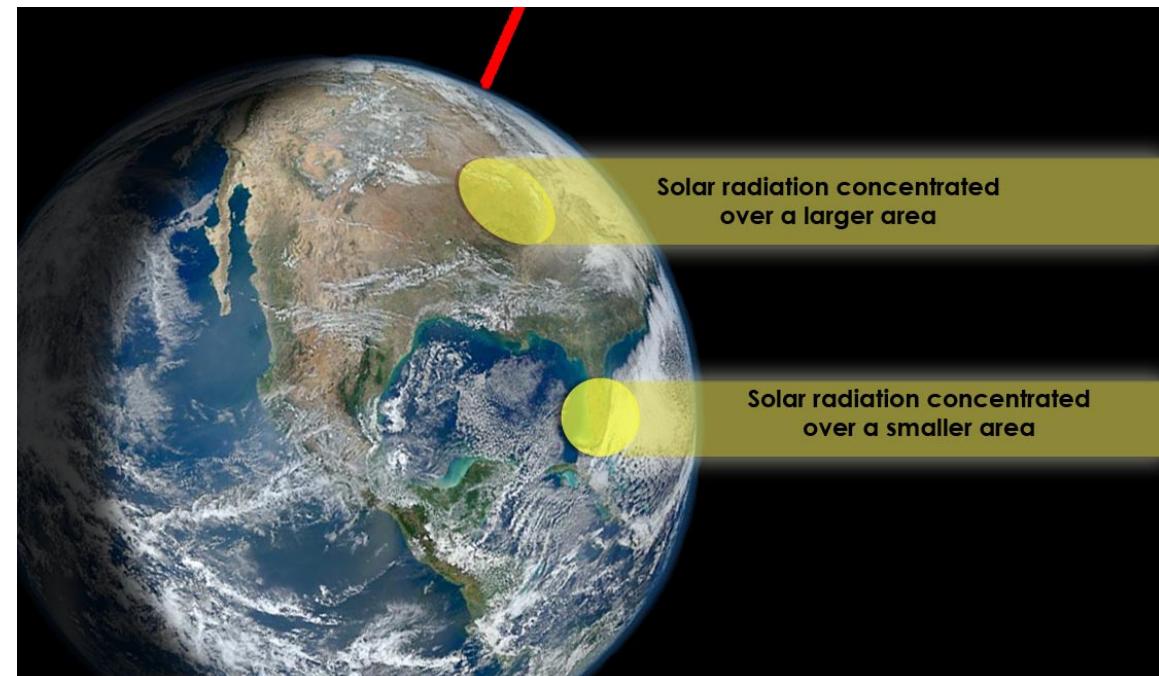
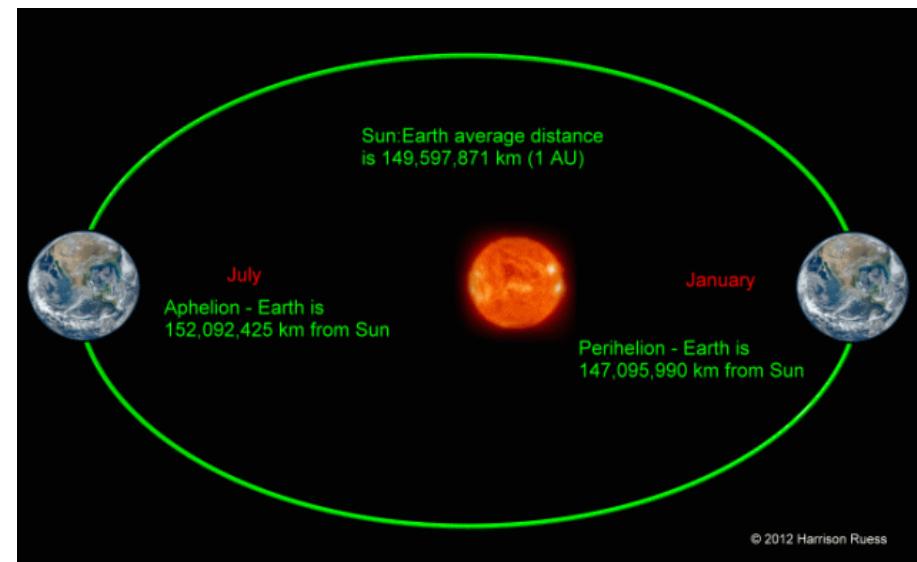


1.4 Ακτινοβολία

[4]

Το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται η επιφάνεια της Γης καθορίζεται από:

- τη **θέση** της Γης ως προς τον Ήλιο
- την **περιστροφή** της Γης γύρω από τον άξονα της
- τη **γεωγραφική θέση** της περιοχής
- την παρουσία **νεφών** και **αιωρούμενων σωματιδίων** στην ατμόσφαιρα
- τις **ιδιότητες** της επιφάνειας (ανακλαστικότητα ή λευκάγεια ή **albedo**)

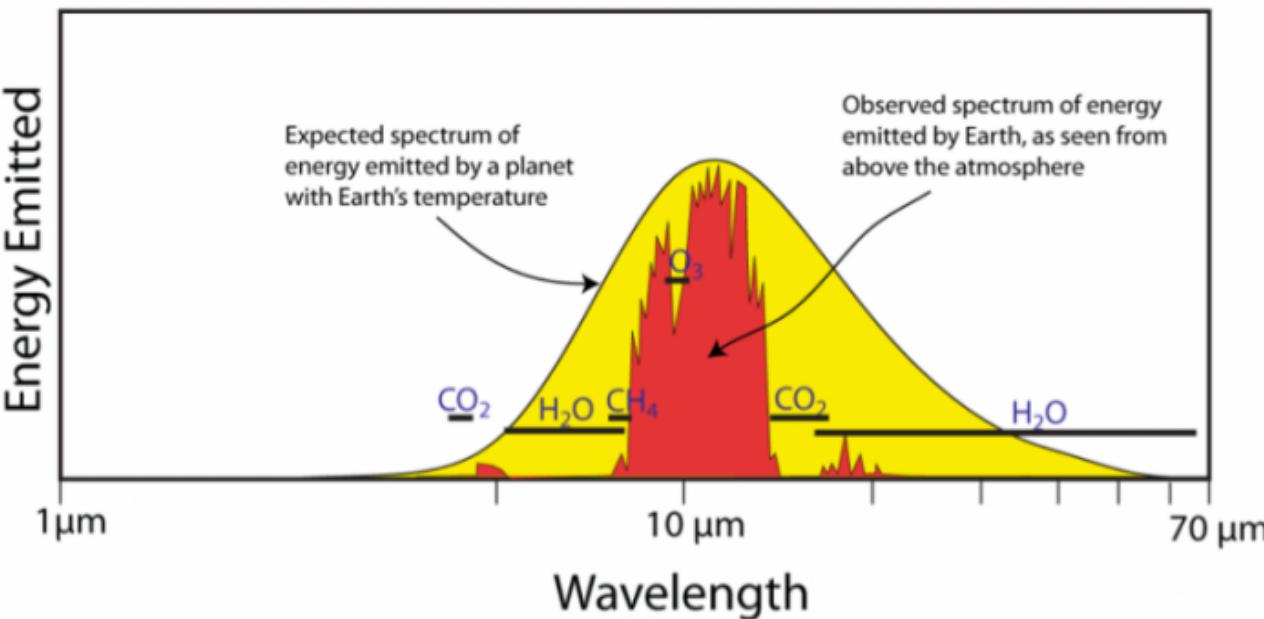


1.4 Ακτινοβολία

[5]



Θεωρούμε ότι η Γη ακτινοβολεί ως **μέλαν σώμα** με θερμοκρασία **288 K**. Στην πραγματικότητα, η ακτινοβολία που εκπέμπει η Γη αντιστοιχεί σε **φαιό σώμα** με συντελεστή εκπομπής μεταξύ **0.85 - 0.99**.

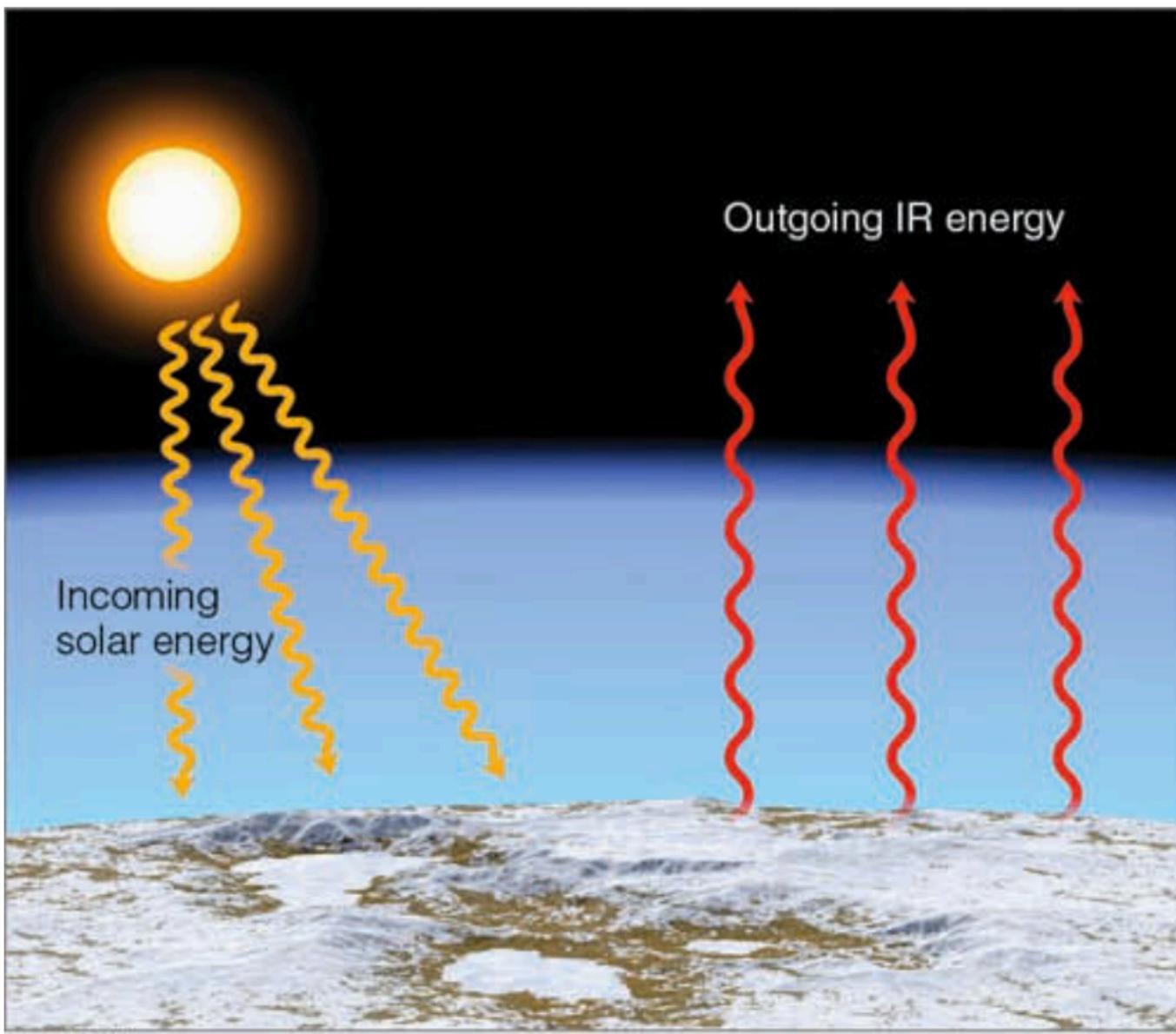


Η **γήινη ακτινοβολία** εκτείνεται μεταξύ **4 - 100 μm**, με **μέγιστο** εκπομπής ($\sim 400 \text{ W m}^{-2}$) στα **10 μm**.

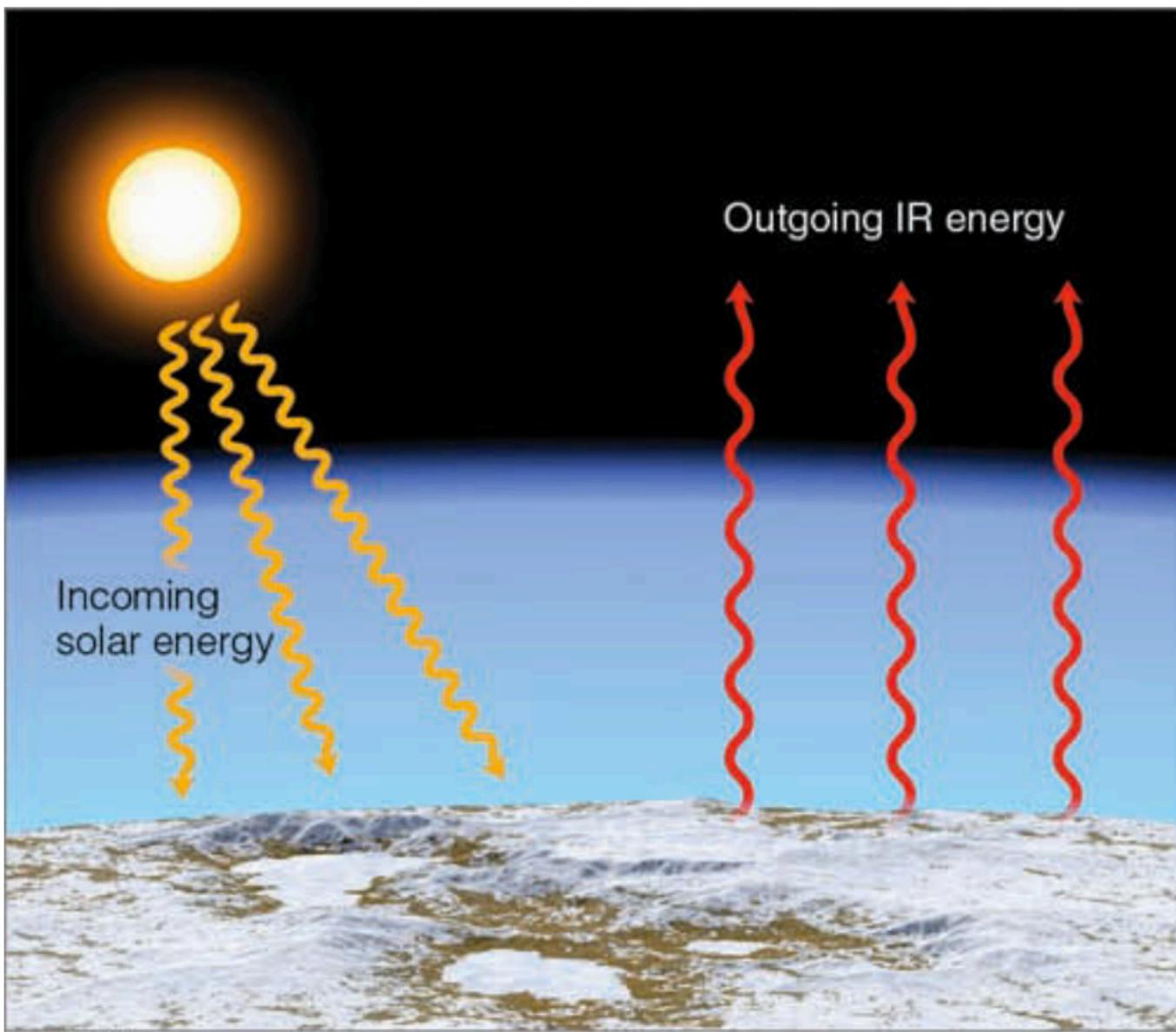
Με άλλα λόγια, η Γη εκπέμπει ακτινοβολία στο **υπέρυθρο (IR)** τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η ακτινοβολία αυτή συχνά χαρακτηρίζεται ως **θερμική**.

1.4 Ακτινοβολία

[6]



Εάν η Γη εκπέμπει συνεχώς ακτινοβολία (IR), τότε γιατί δεν παρατηρούμε μία συνεχιζόμενη ψύξη;



Εισερχόμενη ενέργεια
=
Εξερχόμενη ενέργεια

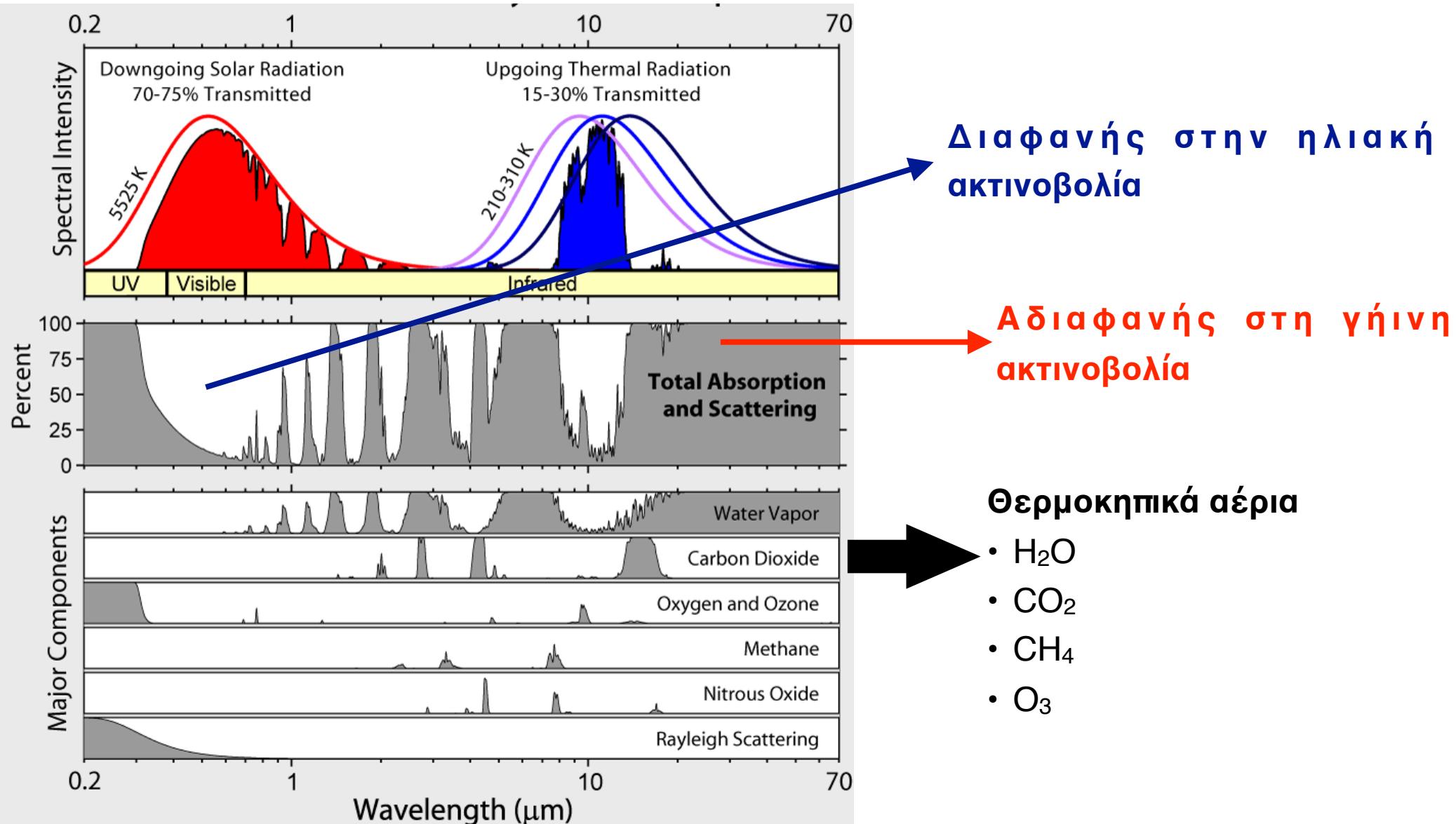
Το **ισοζύγιο ακτινοβολίας** της Γης είναι **μηδενικό!** Με εφαρμογή των αντίστοιχων νόμων, σε αυτή την κατάσταση ισοζυγίου η **θερμοκρασία** της Γης είναι 255 K (**-18 °C**)

Πού οφείλεται η **διαφορά** των **33 K** μεταξύ της **θεωρητικά αναμενόμενης** θερμοκρασίας της Γης (**-18 °C**) και της **πραγματικής** (**15 °C**);

1.4 Ακτινοβολία

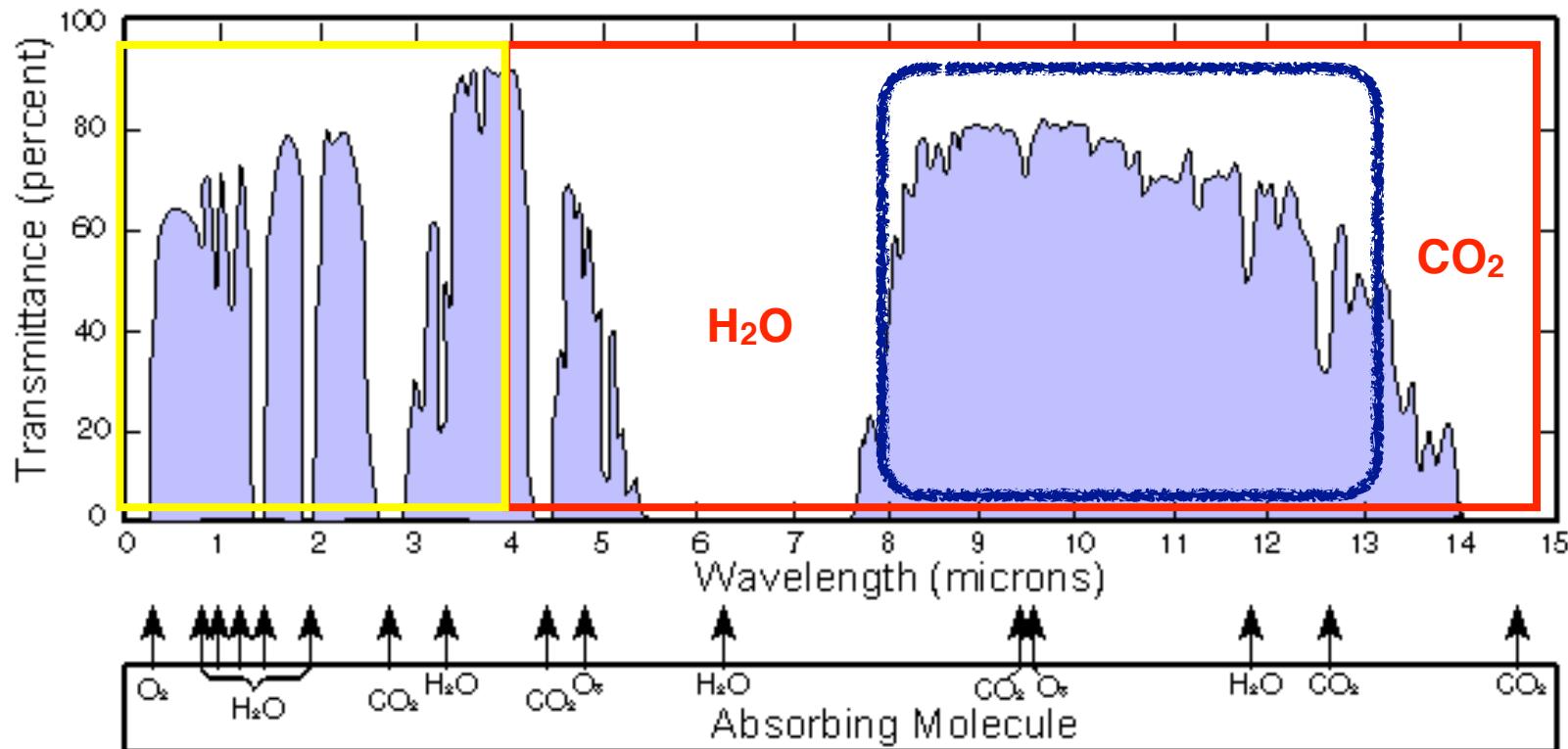
[8]

Σε αντίθεση με τον Ήλιο και τη Γη, η **ατμόσφαιρα** δεν μπορεί να προσεγγιστεί ως μέλαν σώμα, καθώς χαρακτηρίζεται από **επιλεκτική απορρόφηση** και **εκπομπή** ακτινοβολίας.



1.4 Ακτινοβολία

[9]

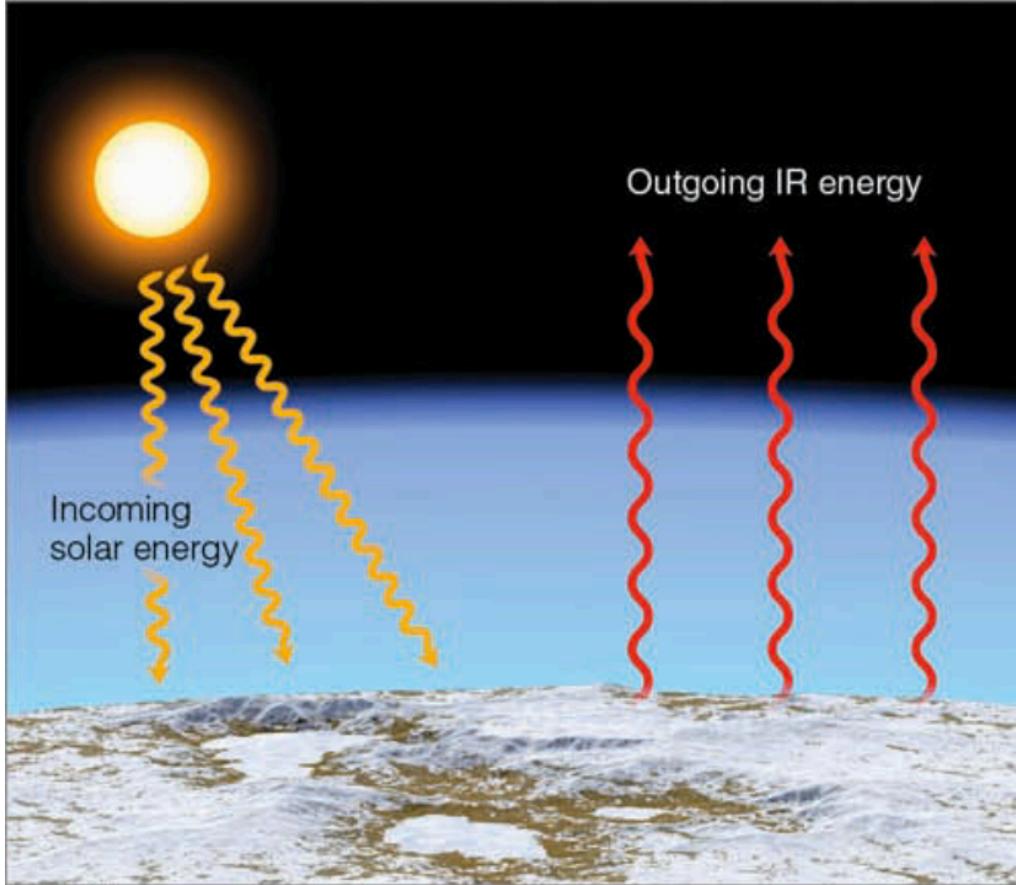


- Κάτω από τα **5 μμ**, η **απορρόφηση** της γήινης ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα είναι **ασήμαντη**.
- Μεταξύ **5 - 8 μμ**, οι **υδρατμοί** της ατμόσφαιρας οδηγούν σε **πολύ ισχυρή απορρόφηση** της γήινης ακτινοβολίας.
- Μεταξύ **8 - 13 μμ**, εντοπίζεται το λεγόμενο **ατμοσφαιρικό παράθυρο**, όπου η ατμόσφαιρα είναι ουσιαστικά **διαφανής** στη γήινη ακτινοβολία.
- Μεταξύ **13 - 15 μμ**, το **διοξείδιο του άνθρακα** καθιστά την ατμόσφαιρα **αδιαφανή** στη γήινη ακτινοβολία.

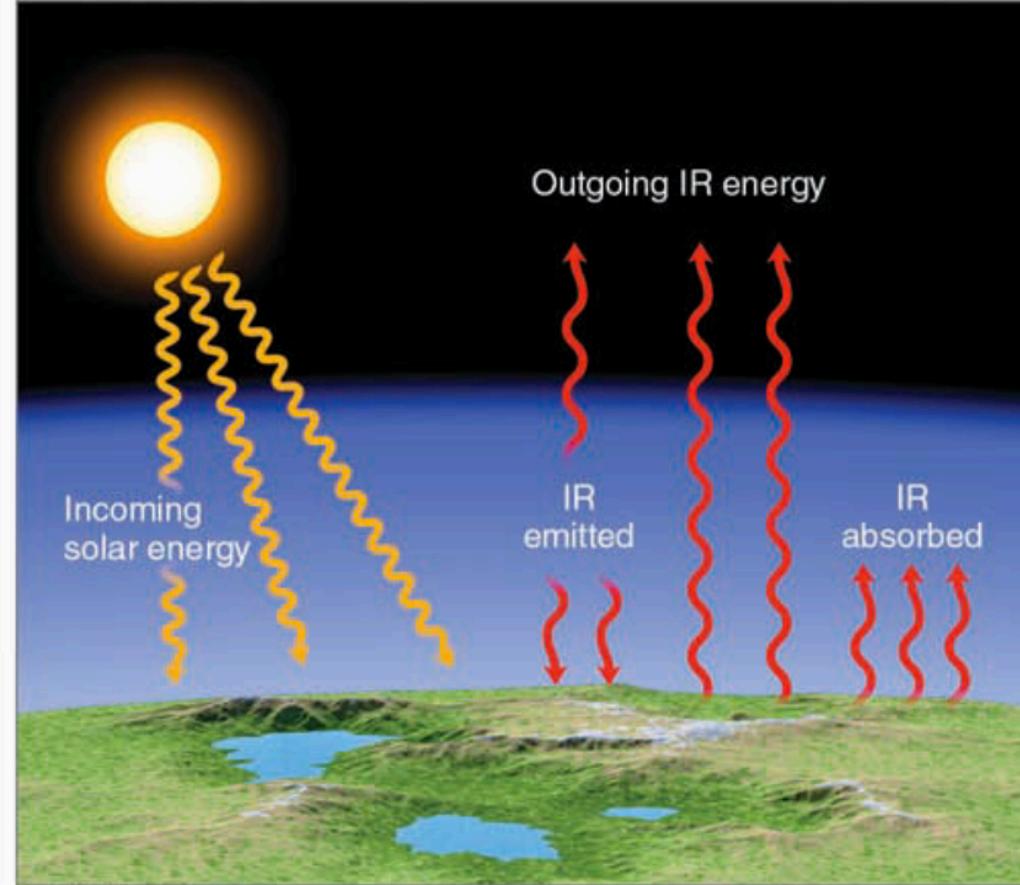
1.5 Το φαινόμενο του Θερμοκηπίου

[1]

Δίχως ατμόσφαιρα



Με ατμόσφαιρα



Η **ατμόσφαιρα** λειτουργεί τελικά ως μία “**κουβέρτα**” η οποία **Θερμαίνει** τη Γη. Επομένως, το “**φυσικό**” φαινόμενο του Θερμοκηπίου δεν αποτελεί απλά ένα “καλό φαινόμενο”, αλλά **αναγκαία και ικανή συνθήκη** για την ανάπτυξη και τη διατήρηση της ζωής στο πλανήτη μας!

1.5 Το φαινόμενο του θερμοκηπίου

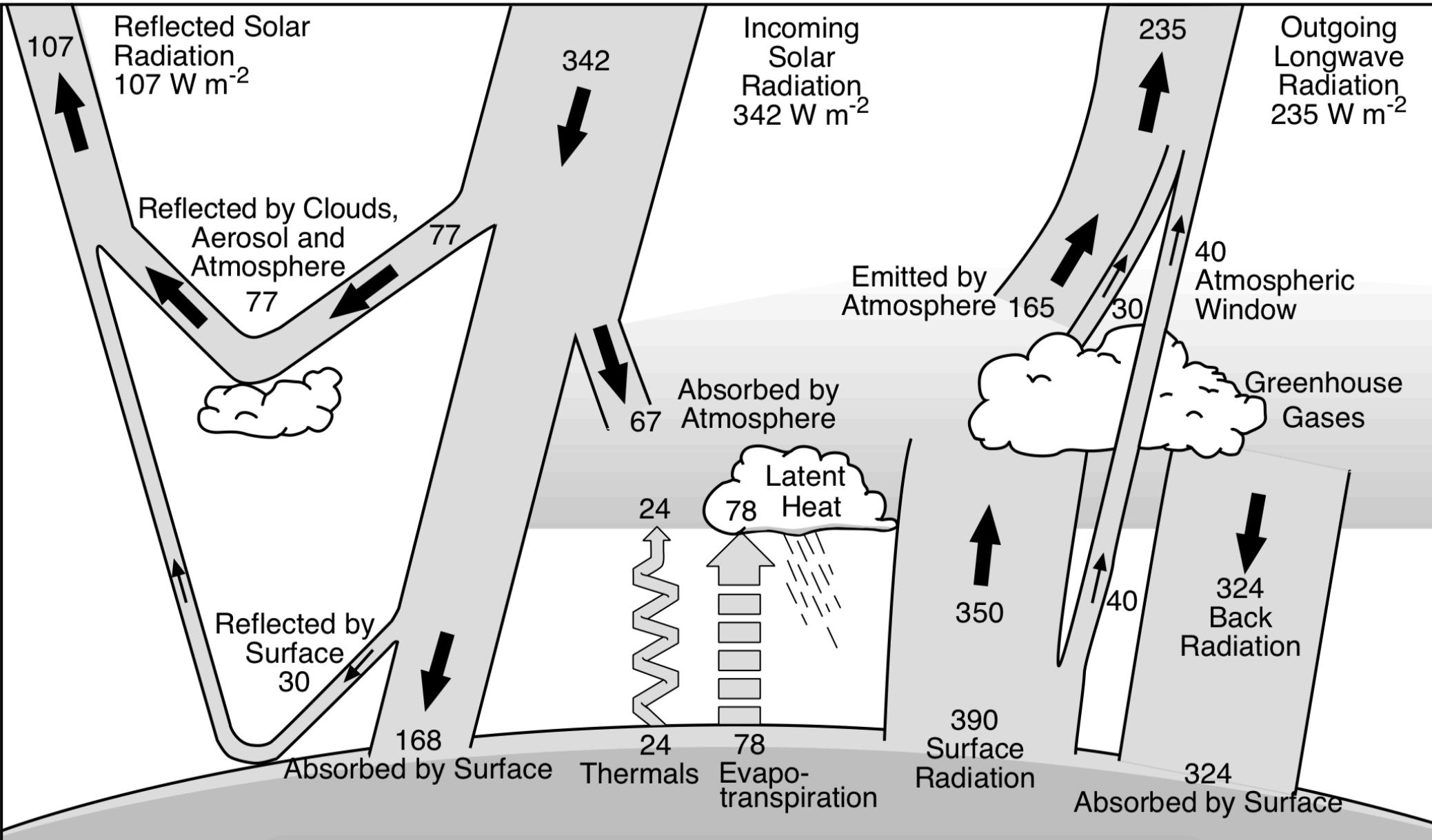
[2]

- Η **ατμόσφαιρα** της Γης είναι **διαφανής** στην **ηλιακή** ακτινοβολία, επιτρέποντας στο ~50% αυτής να φτάσει στην επιφάνεια.
- Η **επιφάνεια** της Γης **απορροφά** μέρος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και **θερμαίνεται**.
- Η **θέρμανση** της επιφάνειας της Γης οδηγεί στην **εκπομπή υπέρυθρης** (IR) ακτινοβολίας.
- Λόγω της σύστασής της, η **ατμόσφαιρα απορροφά ~90%** της **γήινης** ακτινοβολίας, θερμαίνεται και **επανεκπέμπει υπέρυθρη** (IR) ακτινοβολία προς την επιφάνεια.
- Η **απορρόφηση** και **επανεκπομπή** υπέρυθρης ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα οδηγεί τελικά στην **αύξηση της θερμοκρασίας** στην επιφάνεια της Γης.

1.6 Το ενεργειακό ισοζύγιο Γης-Ατμόσφαιρας

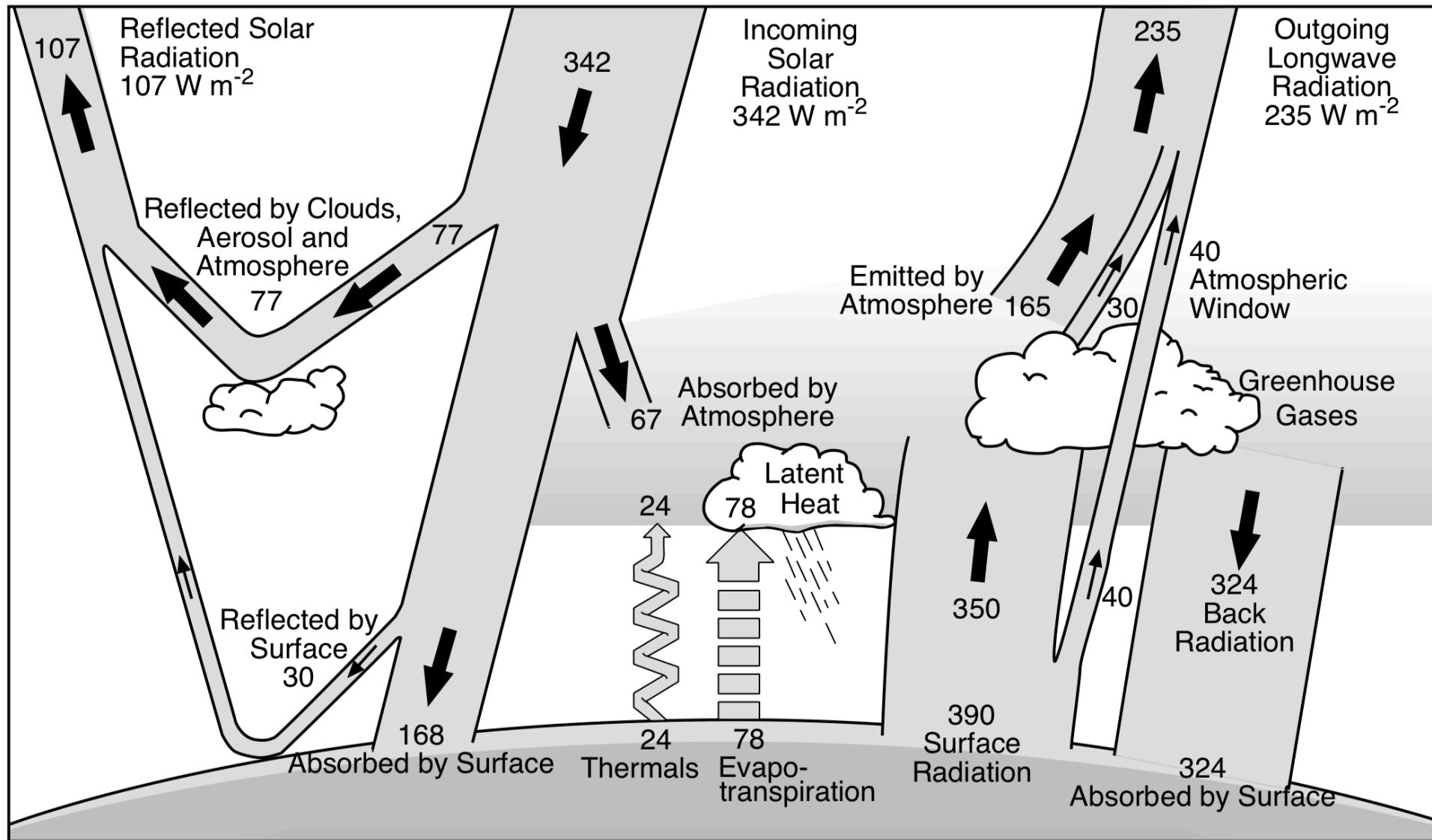
[1]

Ενεργειακό ισοζύγιο: Η **διαφορά** μεταξύ **εισερχόμενης** και **εξερχόμενης** ενέργειας από το σύστημα Γη-Ατμόσφαιρα, θεωρούμενη σε ένα μεγάλο χρονικό διάστημα (έτος).



1.6 Το ενεργειακό ισοζύγιο Γης-Ατμόσφαιρας

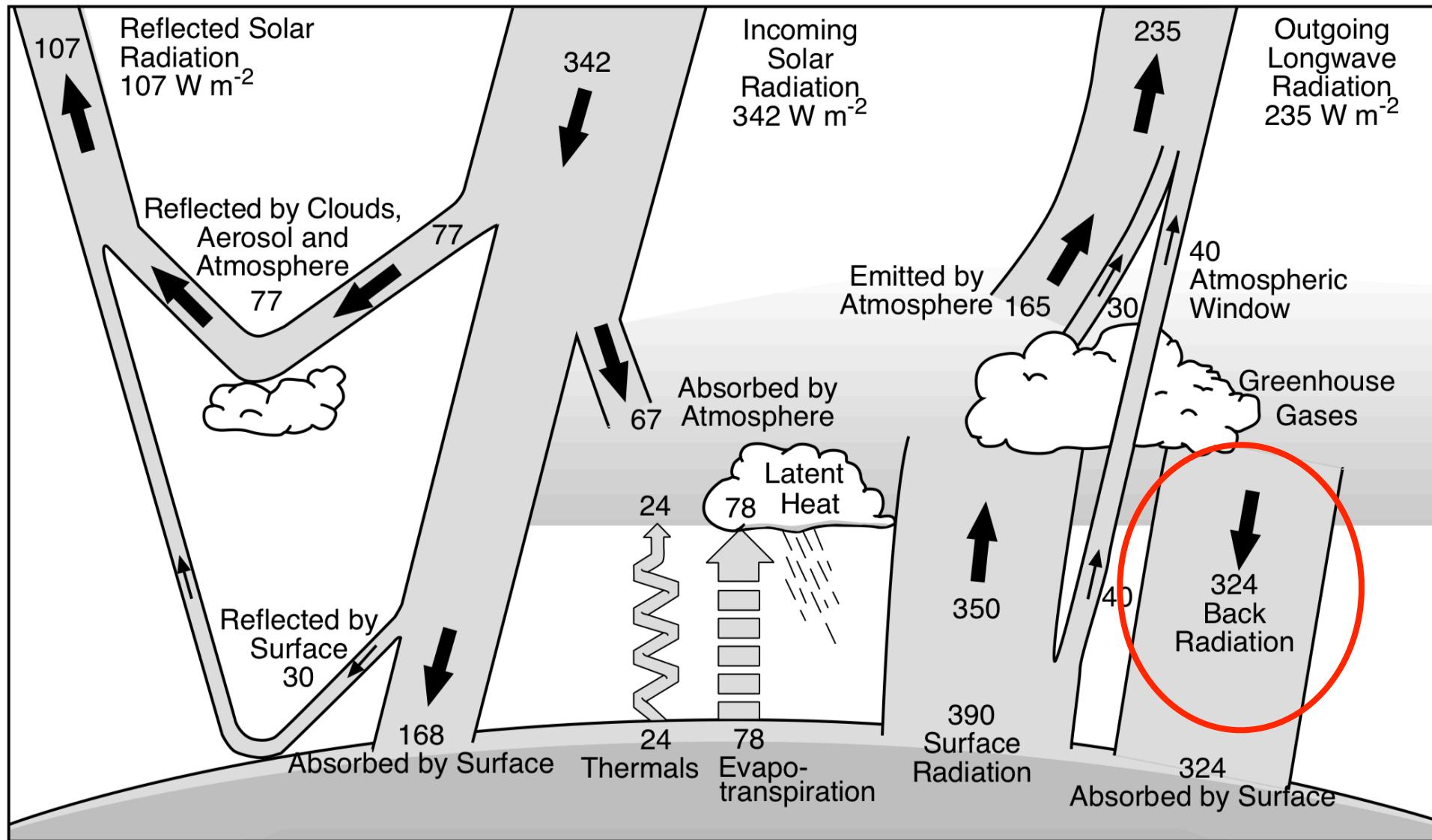
[2]



- 30% της εισερχόμενης **ηλιακής** ακτινοβολίας **ανακλάται** στο διάστημα.
- 50% **απορροφάται** από την **επιφάνεια** της Γης.
- 20% **απορροφάται** από την **ατμόσφαιρα** της Γης.

1.6 Το ενεργειακό ισοζύγιο Γης-Ατμόσφαιρας

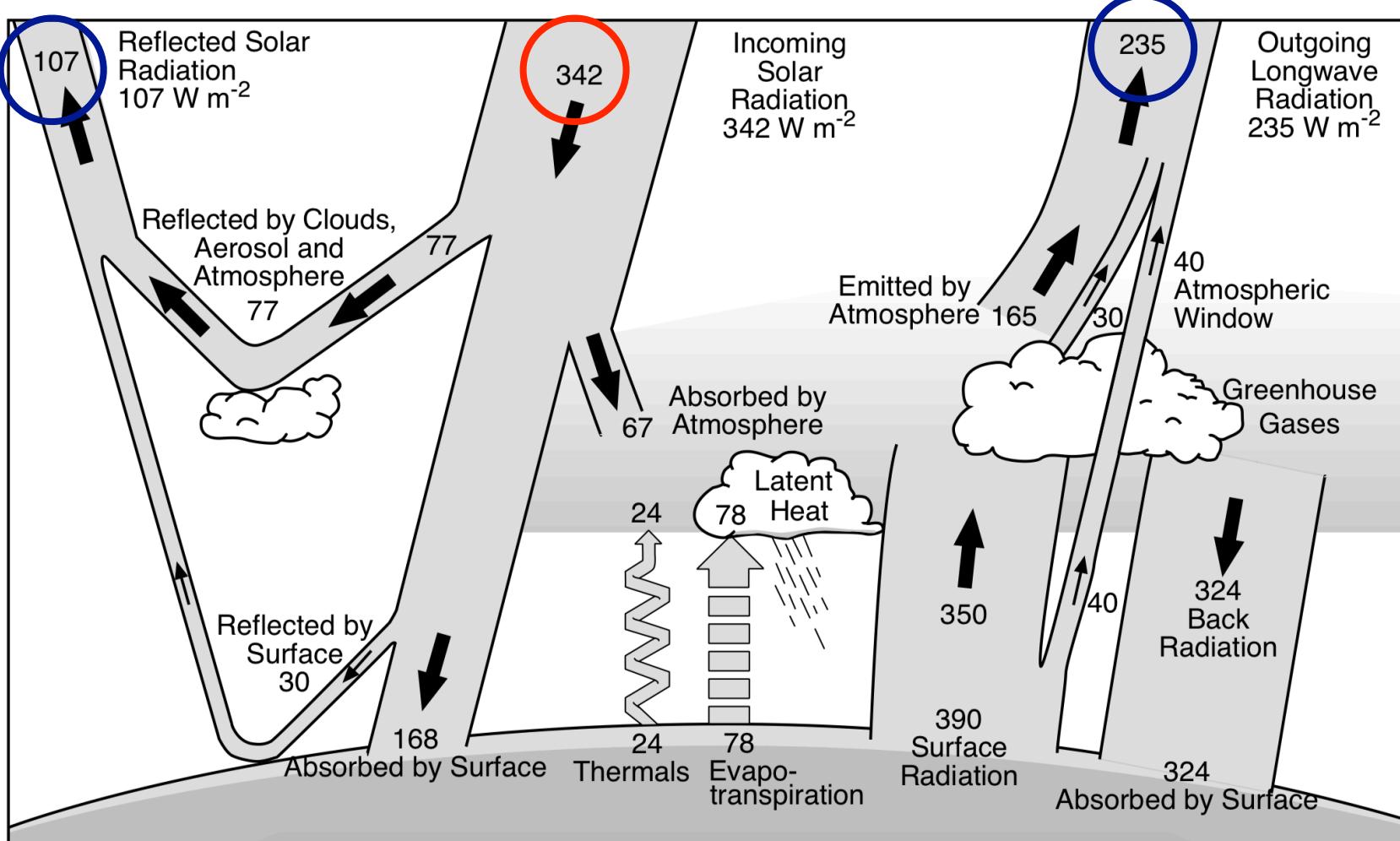
[3]



- 10% της εξερχόμενης **γήινης** ακτινοβολίας **διαφεύγει** στο διάστημα.
- 90% **απορροφάται** από την **ατμόσφαιρα** της Γης.

1.6 Το ενεργειακό ισοζύγιο Γης-Ατμόσφαιρας

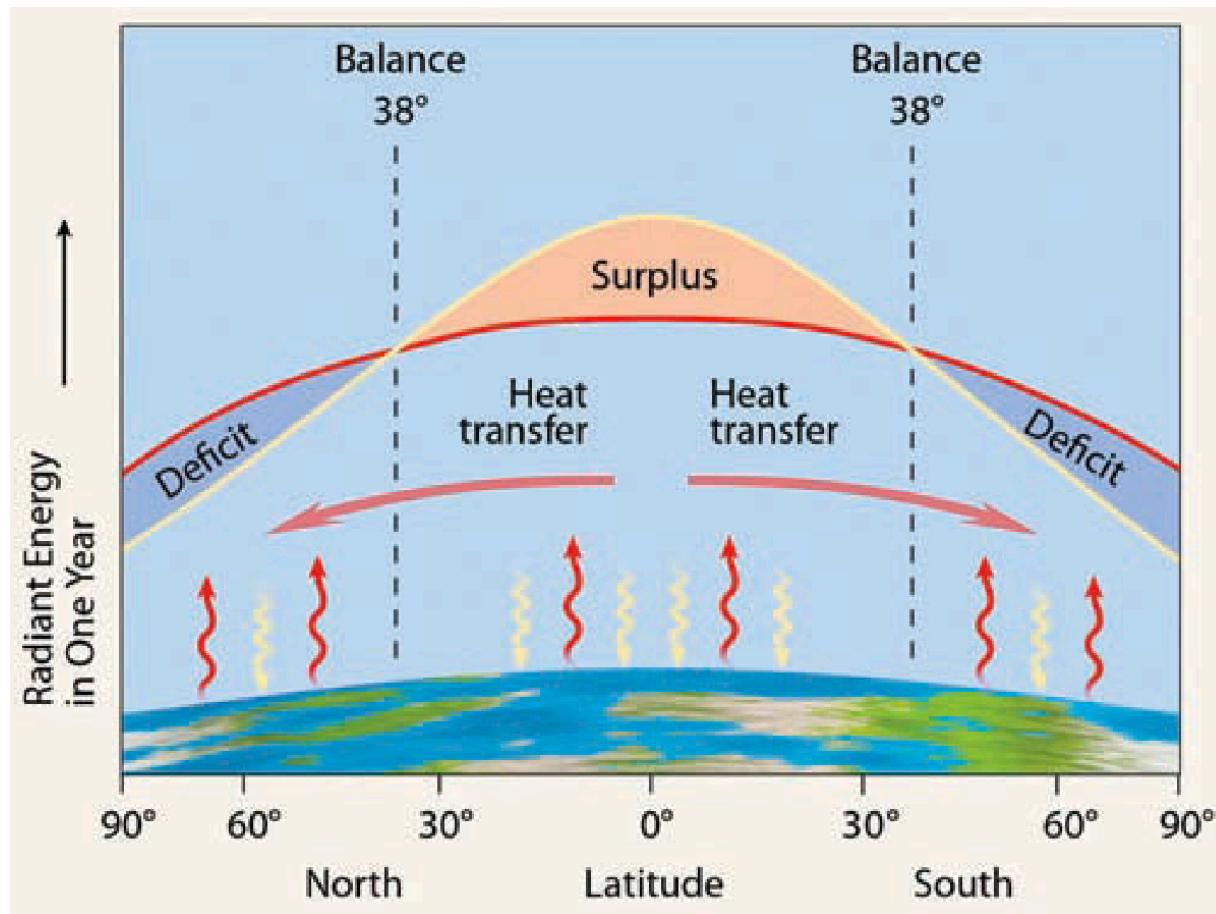
[4]



Σε ετήσια κλίμακα, το σύστημα **Γη-Ατμόσφαιρα** παρουσιάζει **μηδενικό πλεόνασμα/έλλειμμα** ενέργειας, με αποτέλεσμα τη διατήρηση της **Θερμοκρασίας** του πλανήτη σε **σχεδόν σταθερά** επίπεδα. Αυτό **δε** σημαίνει πως η θερμοκρασία της Γης δεν μεταβάλλεται, αλλά πως οι **μεταβολές** της από **έτος σε έτος** είναι **μικρές** και καθίστανται **σημαντικές** μόνο όταν εξετάζονται σε βάθος **πολλών ετών**.

1.6 Το ενεργειακό ισοζύγιο Γης-Ατμόσφαιρας

[5]

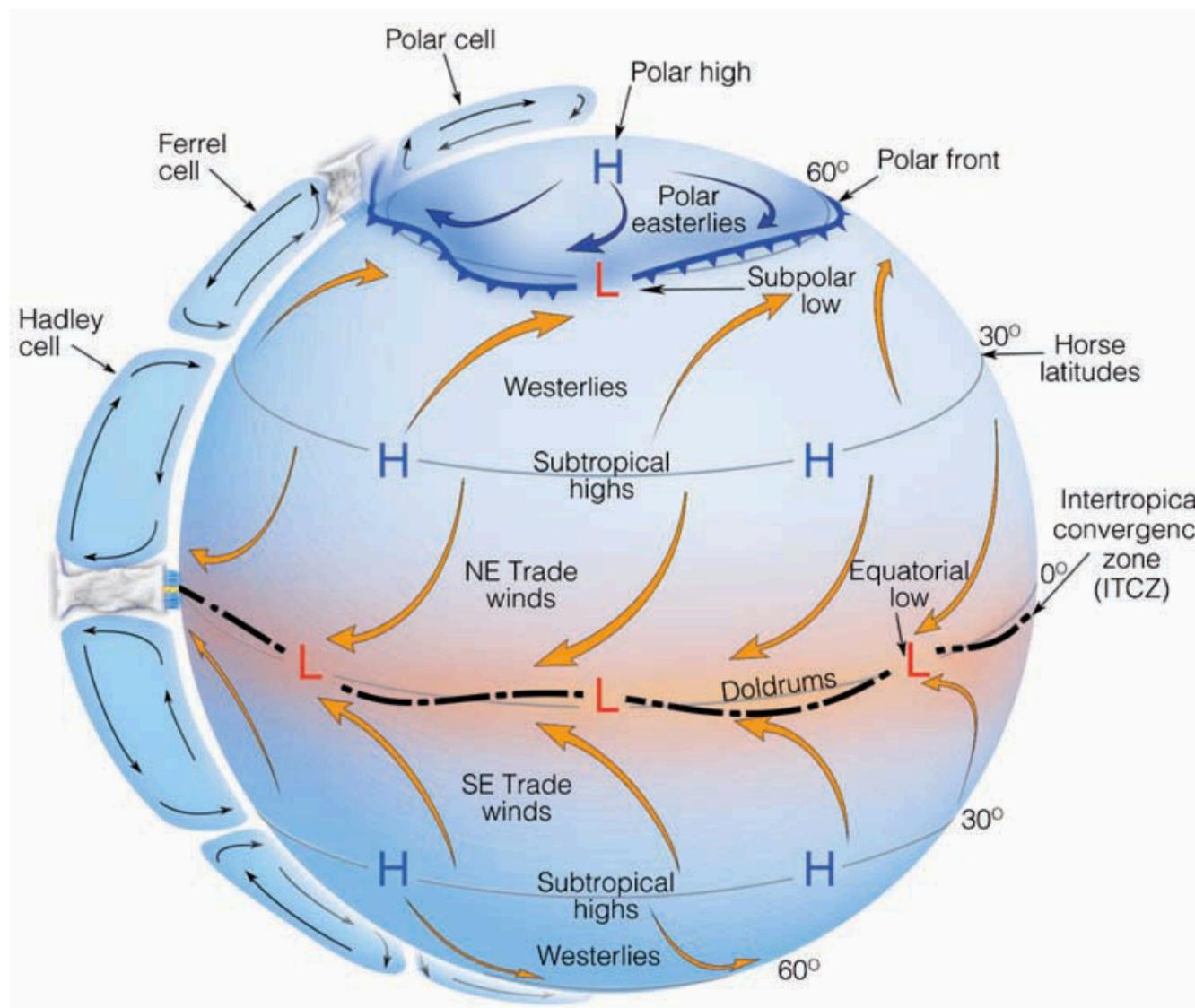


Η εξέταση του **ενεργειακού ισοζυγίου** Γης-Ατμόσφαιρας σε συνάρτηση με το **γεωγραφικό πλάτος** καταδεικνύει:

- ενεργειακό **πλεόνασμα** στην περιοχή γύρω από τον **ισημερινό** (τροπικοί)
- ενεργειακό **έλλειμμα** στους πόλους

Γιατί οι **πόλοι** δεν ψύχονται συνεχώς και οι **τροπικοί** δε θερμαίνονται συνεχώς;

1.7 Η γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας



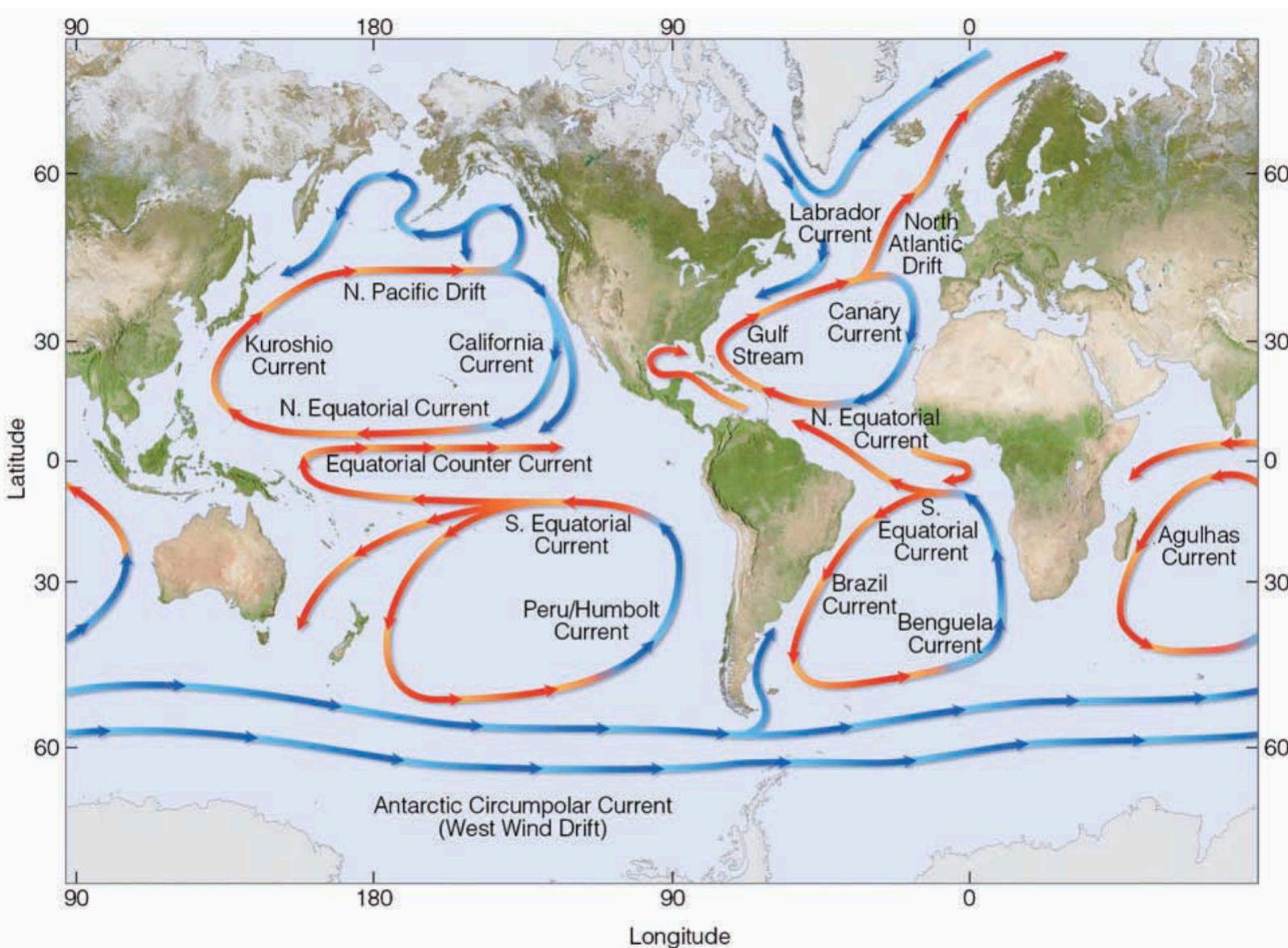
Μοντέλο 3 κυττάρων:

- Κύτταρο **Hadley**
- Κύτταρο **Ferrel**
- **Πολικό κύτταρο**

Η ανομοιογενής θέρμανσης της Γης πυροδοτεί τη λεγόμενη **γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας**, η οποία **αναδιανείμει** τη διαθέσιμη ενέργεια από τον **ισημερινό** (πλεόνασμα) προς τους **πόλους** (έλλειμμα).

1.8 Άλλοι παράγοντες καθορισμού του κλίματος

[1]



Αναδιανομή του πλεονάσματος ενέργειας από τον **ισημερινό** προς τους **πόλους** λαμβάνει χώρα και μέσω του δικτύου των **ωκεάνιων ρευμάτων**.

1.8 Άλλοι παράγοντες καθορισμού του κλίματος

[2]

Σε **περιοχική/τοπική** κλίμακα, το κλίμα καθορίζεται επίσης από τη **φυσιογραφία** της περιοχής:

- **χρήση/κάλυψη γης**

Στις **αστικές** περιοχές παρατηρείται το φαινόμενο της **θερμικής νησίδας**, λόγω της αποτελεσματικής απορρόφησης της ακτινοβολίας από τις διάφορες επιφάνειες (δρόμοι, κτίρια, κ.τ.λ.).

- **ορογραφία/τοπογραφία**

Η **τοπογραφία** μιας περιοχής μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία των λεγόμενων **τοπικών κυκλοφοριών του ανέμου** (αύρα βουνού/κοιλάδας), ενώ είναι γνωστό πως η θερμοκρασία **ελαττώνεται** με το υψόμετρο (-6.5 °C/km).

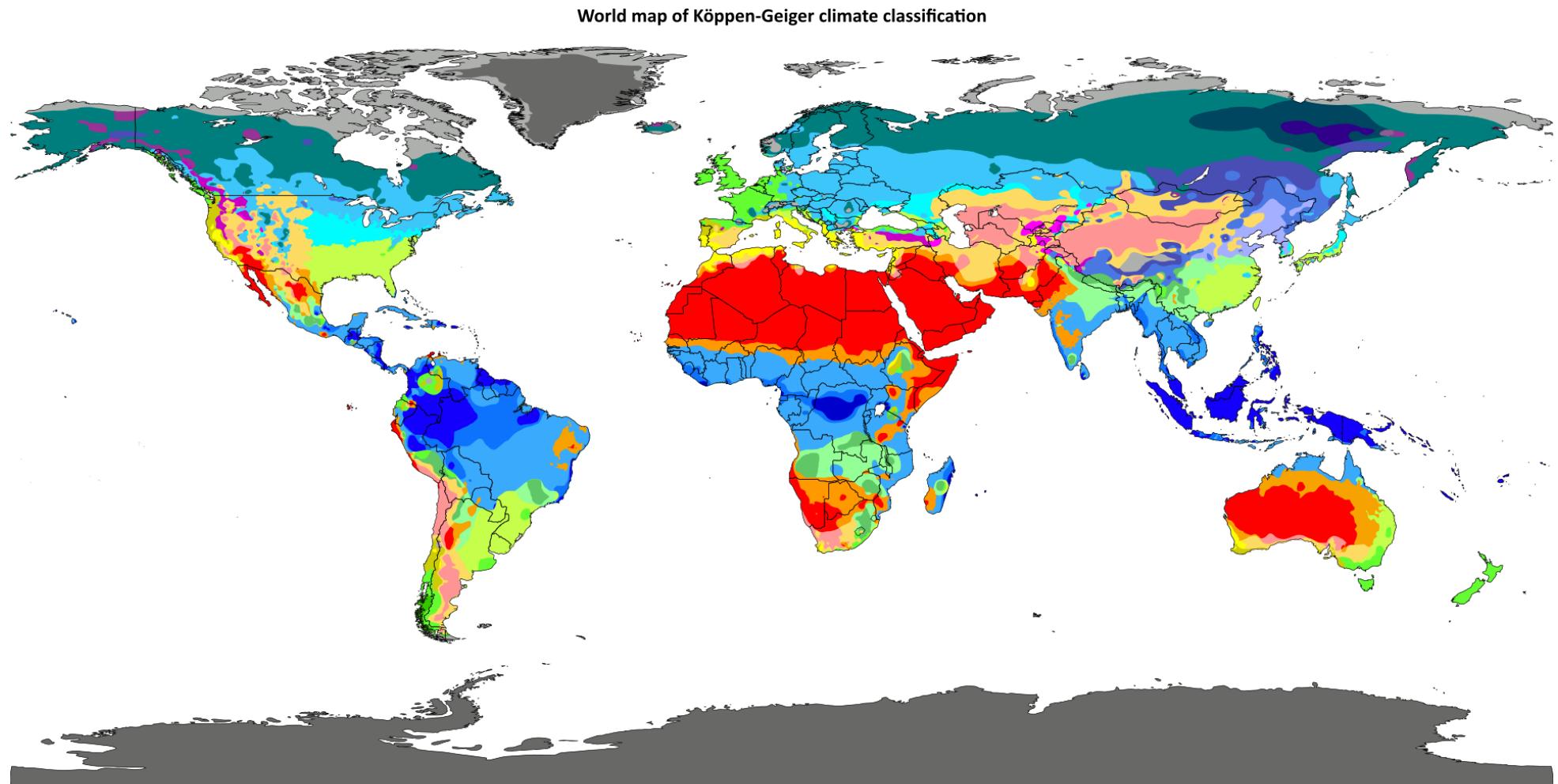
- **ηπειρωτικότητα**

Η **απόσταση** μιας περιοχής από τη θάλασσα παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση του κλίματος, κυρίως μέσω της ανάπτυξης **τοπικών κυκλοφοριών του ανέμου** (θαλάσσια/απόγειος αύρα).

1.9 Η γεωγραφία του κλίματος σε παγκόσμια κλίμακα

[1]

Κλιματικές ζώνες κατά Köppen-Geiger



Peel, M. C. and Finlayson, B. L.
and McMahon, T. A. (2007)
(University of Melbourne)

Vectorization by : Ali Zifan

1.9 Η γεωγραφία του κλίματος σε παγκόσμια κλίμακα

[2]

Köppen climate classification scheme symbols description table^[1]

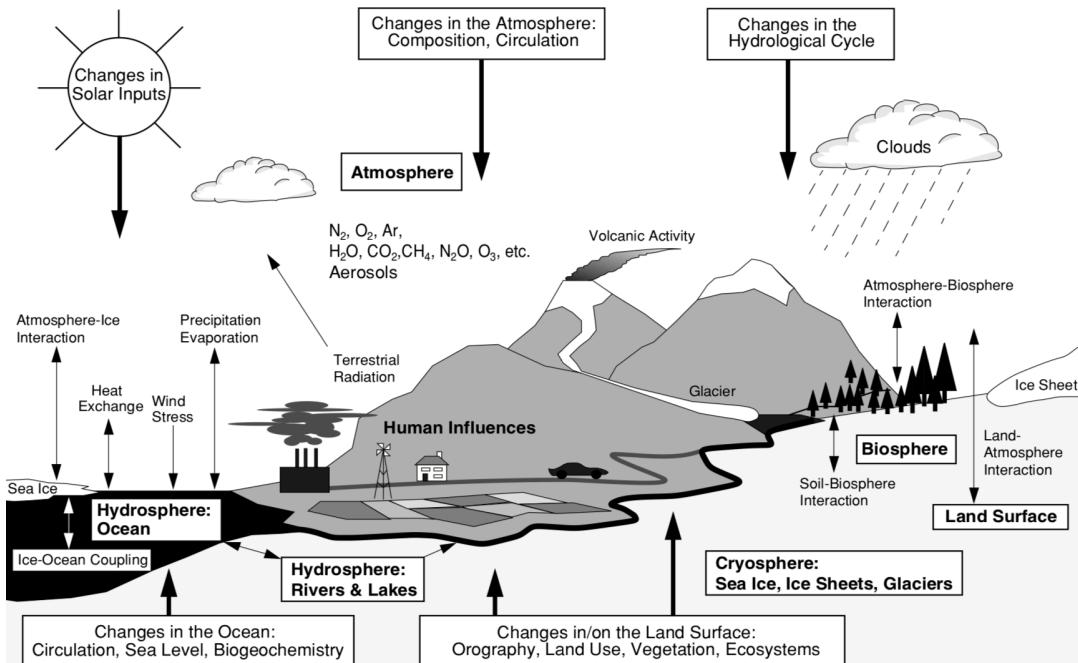
1st	2nd	3rd
A (Tropical)	f (Rainforest)	
	m (Monsoon)	
	w (Savanna, Wet)	
	s (Savanna, Dry)	
B (Arid)	W (Desert)	
	S (Steppe)	
		h (Hot)
		k (Cold)
		n (With frequent fog) ^[10]
C (Temperate)	s (Dry summer)	
	w (Dry winter)	
	f (Without dry season)	
		a (Hot summer)
		b (Warm summer)
		c (Cold summer)
D (Cold (continental))	s (Dry summer)	
	w (Dry winter)	
	f (Without dry season)	
		a (Hot summer)
		b (Warm summer)
		c (Cold summer)
E (Polar)		d (Very cold winter)
	T (Tundra)	
	F (Eternal winter (ice cap))	

Η **κατηγοριοποίηση** γίνεται με βάση τη **θερμοκρασία** και τη **διαθεσιμότητα** του υετού.

Με βάση αυτή την κατηγοριοποίηση, η **Κρήτη** εντάσσεται στη κλιματική ζώνη **Csa**:

- C: Εύκρατο κλίμα
- s: Ξηρά καλοκαίρια
- a: Θερμά καλοκαίρια

Σύνοψη



Η κατανόηση του κλιματικού συστήματος και, κατ' επέκταση, του κλίματος προϋποθέτει τη **βασική κατανόηση** των συνιστωσών αυτού και των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων.

Κομβικό ρόλο στη λειτουργία του κλιματικού συστήματος παίζει η **ακτινοβολία** και, ειδικότερα, η **διάδοση** και η **απορρόφηση** της μέσα στην ατμόσφαιρα της Γης.

Συνεπώς, η **κύρια σύνδεση** μεταξύ των **ανθρωπογενών δραστηριοτήτων** και της **κλιματικής αλλαγής** εδράζεται στη βάση της **μεταβολής της σύστασης** της ατμόσφαιρας:

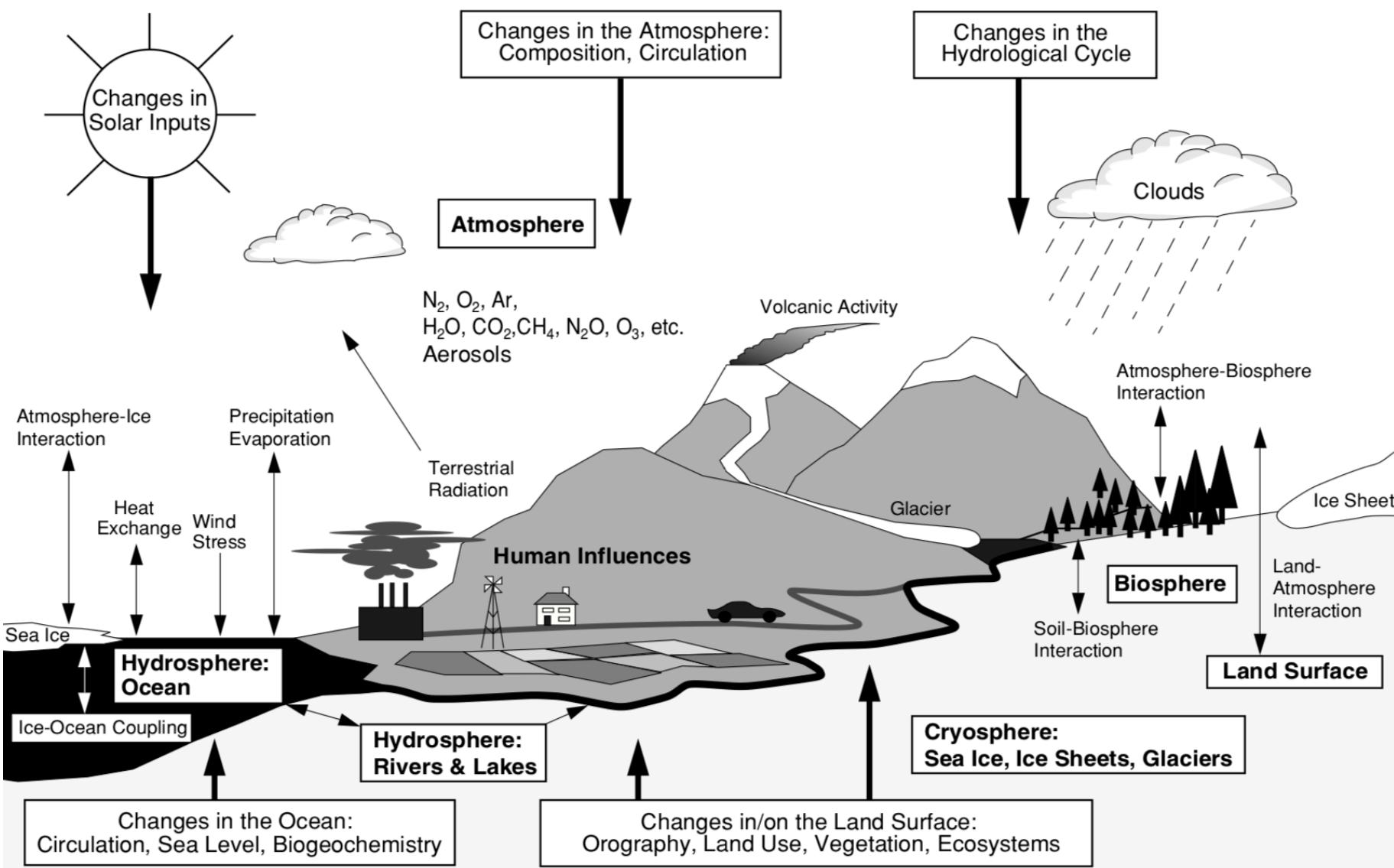
- αύξηση των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου
- εκπομπή νέων αερίων του θερμοκηπίου

Δομή και στόχοι μαθήματος

Ενότητα 2: Φυσική μεταβλητότητα του κλίματος

- Γενική **επισκόπηση**
- Μηχανισμοί **εξωτερικής επιβολής** του κλίματος
- Μηχανισμοί **εσωτερικής επιβολής** του κλίματος
- Κλιματικές **αναδράσεις**
- Οι κλιματικές αναδράσεις των **νεφών**

2.1 Γενική επισκόπηση

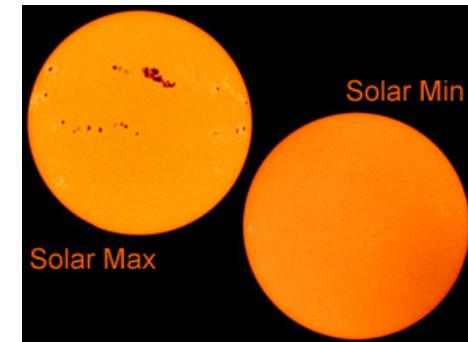
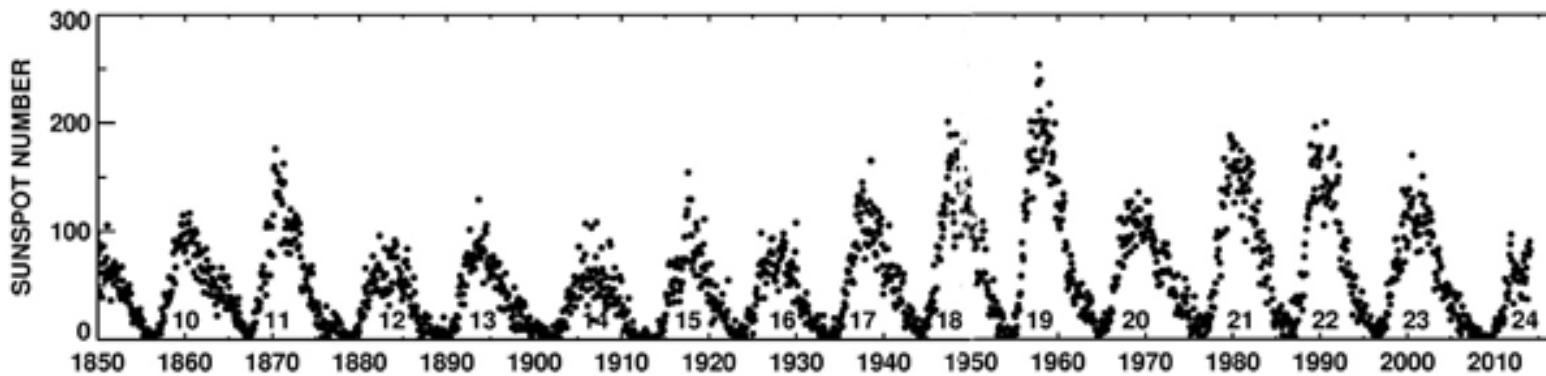


Η εξέταση της **φυσικής μεταβλητότητας** του κλίματος αποτελεί **βασική προϋπόθεση** για την **ανάδειξη** των **μεταβολών** εκείνων που οφείλονται στην **ανθρωπογενή δραστηριότητα**.

2.2 Μηχανισμοί εξωτερικής επιβολής του κλίματος

[1]

Ο 11-ετής κύκλος του Ήλιου



Η ηλιακή δραστηριότητα παρουσιάζει **μεταβολές** με περίοδο μεταξύ **10 και 12 ετών**. Οι μεταβολές αποδίδονται στην εμφάνιση των λεγόμενων **ηλιακών κηλίδων**, οι οποίες συνδέονται άμεσα με την **αύξηση** της εκπεμπόμενης από τον Ήλιο **ακτινοβολίας**.

Μεταξύ ενός ηλιακού **μεγίστου** και **ελαχίστου**:

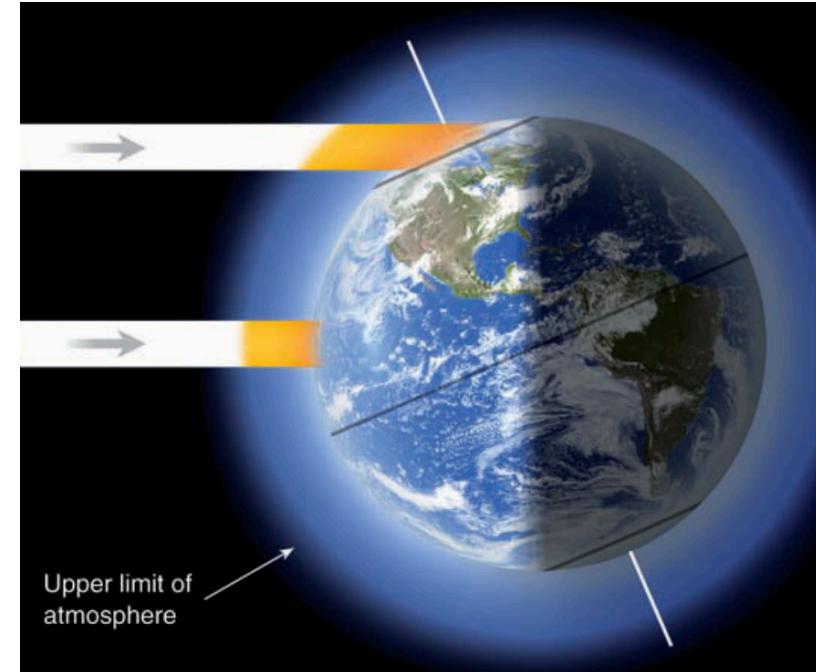
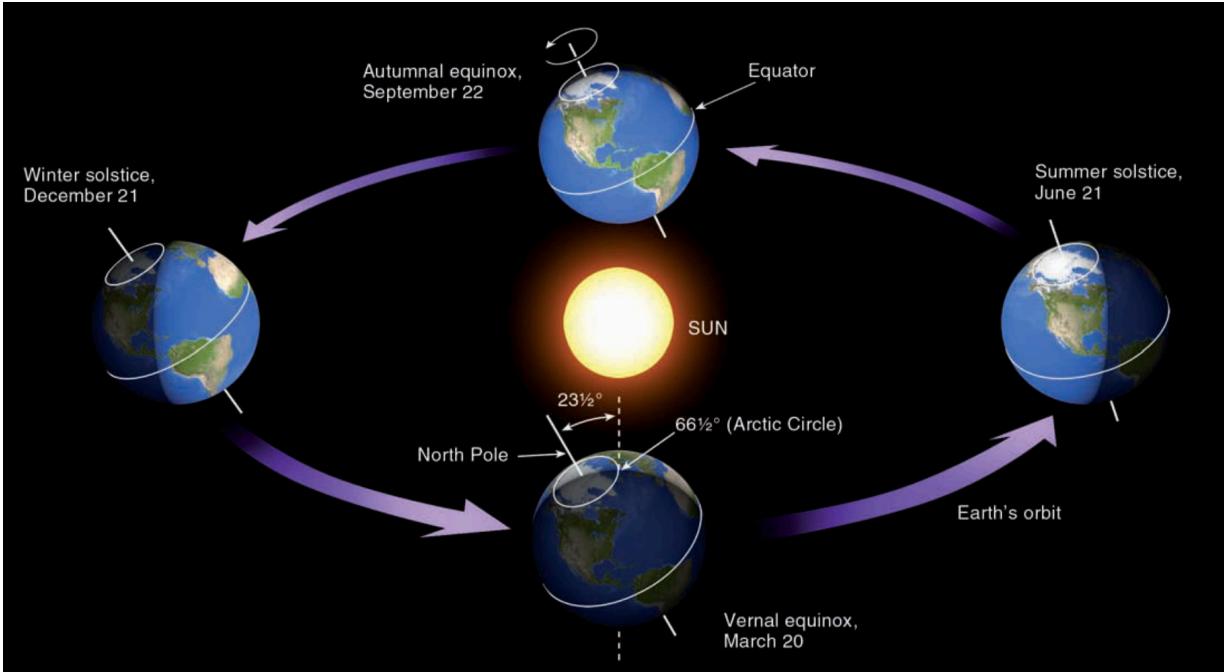
- η διαφορά στην ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο **ανώτερο όριο** της ατμόσφαιρας είναι της τάξης του **1.5 W m⁻²**
- η διαφορά στην ηλιακή ακτινοβολία που **απορροφάται** στην επιφάνεια της Γης είναι της τάξης των **0.2 W m⁻²**

Τέλος, η μεταβλητότητα της ίδιας της περιόδου του 11-ετή κύκλου έχει αποδειχθεί ότι συνδέεται με τη μέση θερμοκρασία του πλανήτη μας, με τις **μικρότερες περιόδους** να αντιστοιχούν σε **υψηλότερες θερμοκρασίες**.

2.2 Μηχανισμοί εξωτερικής επιβολής του κλίματος

[2]

Ημερήσιος και ετήσιος κύκλος της ηλιακής ακτινοβολίας



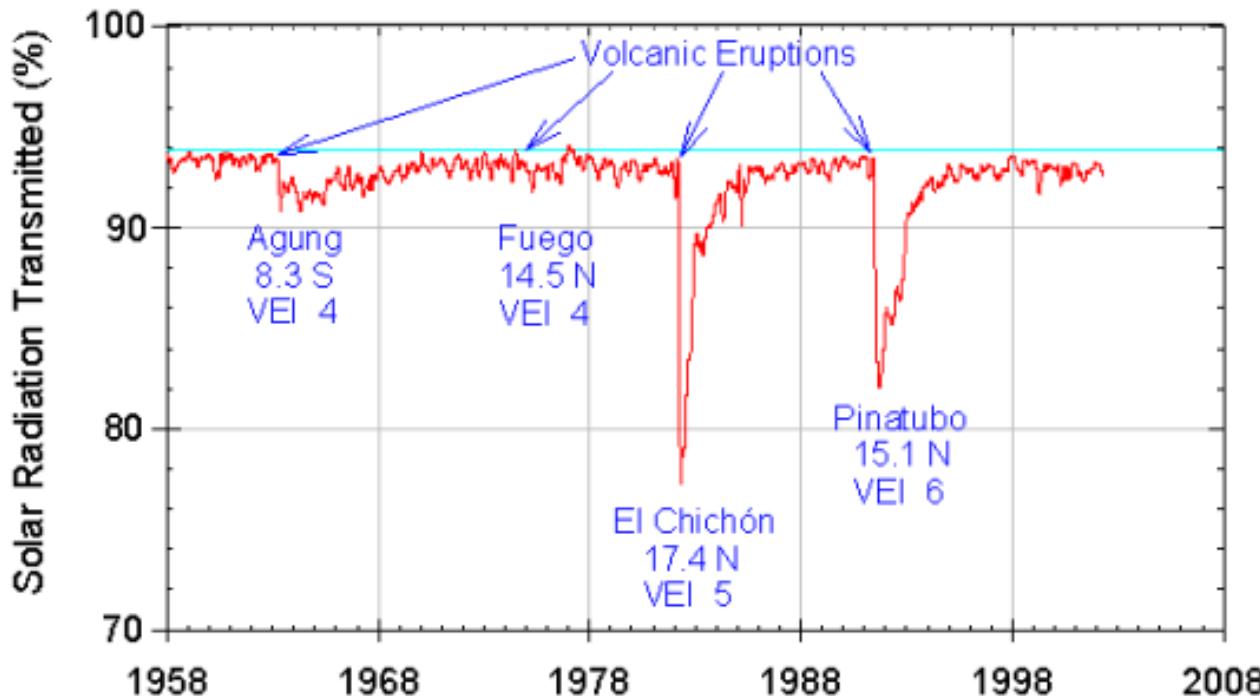
Λόγω της **περιστροφής** της Γης γύρω από τον άξονα της, η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει **ημερήσιο κύκλο** με μεγάλο πλάτος. Ο κύκλος αυτός είναι περισσότερο εμφανής στον **ισημερινό** και λιγότερο στους **πόλους**.

Λόγω της **περιφοράς** της Γης γύρω από τον Ήλιο και της **κλίσης** (23.5°) του άξονα της, η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει, επίσης, **εποχιακές** μεταβολές. Μεταξύ Ιουλίου (**αφήλιο**) και Ιανουαρίου (**περιήλιο**), η διαφορά στην προσπίπτουσα στο ανώτερο όριο της ατμόσφαιρας ακτινοβολία μπορεί να φτάσει στο **6%**.

2.2 Μηχανισμοί εξωτερικής επιβολής του κλίματος

[3]

Ηφαιστειακή δραστηριότητα

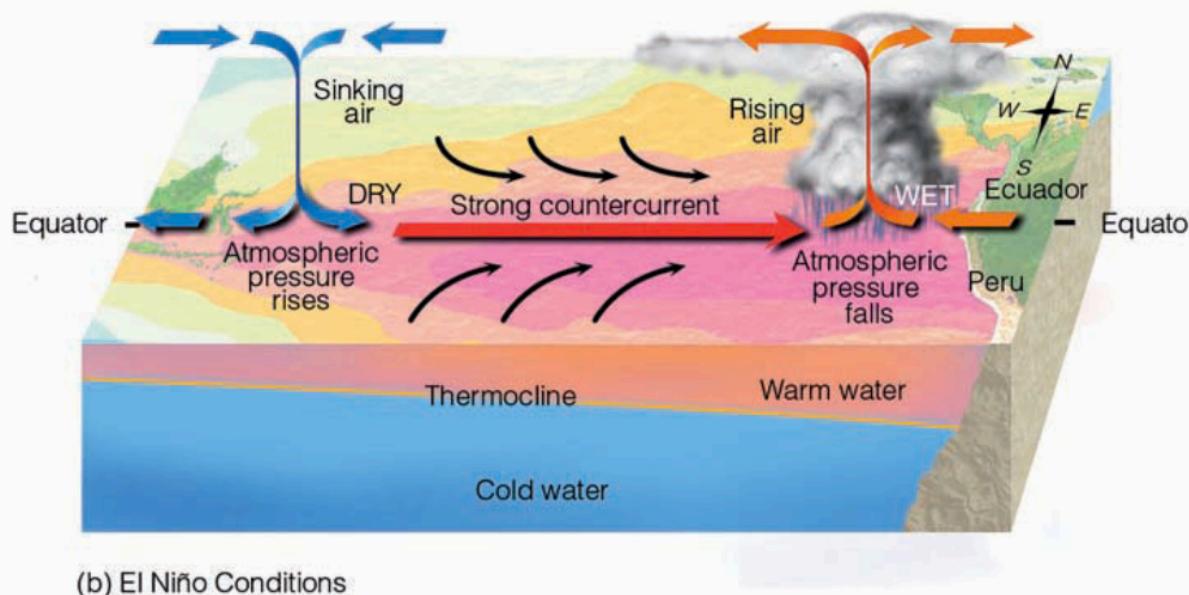
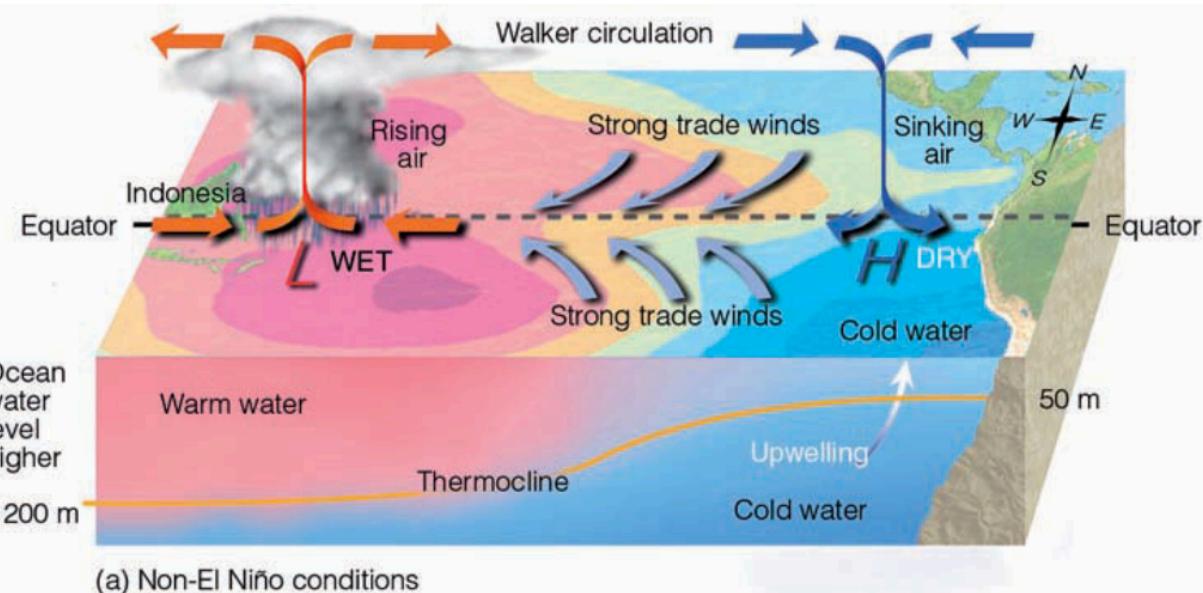


Η **έκρηξη** ενός ηφαιστείου διοχετεύει στην ατμόσφαιρα **μεγάλες ποσότητες αερίων** (κυρίως **θειούχων**) και **αιωρούμενων σωματιδίων** (τέφρα, σκόνη), οδηγώντας τελικά στην **μεταβολή** των ιδιοτήτων της ατμόσφαιρας αναφορικά με τη **διάδοση** της ακτινοβολίας. Η **επίδραση** μιας μεγάλης ηφαιστειακής έκρηξης στο παγκόσμιο κλίμα μπορεί να έχει διάρκεια μέχρι και **3 έτη**, ιδιαίτερα όταν οι εκπεμπόμενες θειούχες ενώσεις εισέρχονται στη **στρατόσφαιρα**, όπου ο **χρόνος απομάκρυνσης** τους **αυξάνεται** σημαντικά.

2.3 Μηχανισμοί εσωτερικής επιβολής του κλίματος

[1]

Νότια Ταλάντωση - El Niño Southern Oscillation (ENSO)



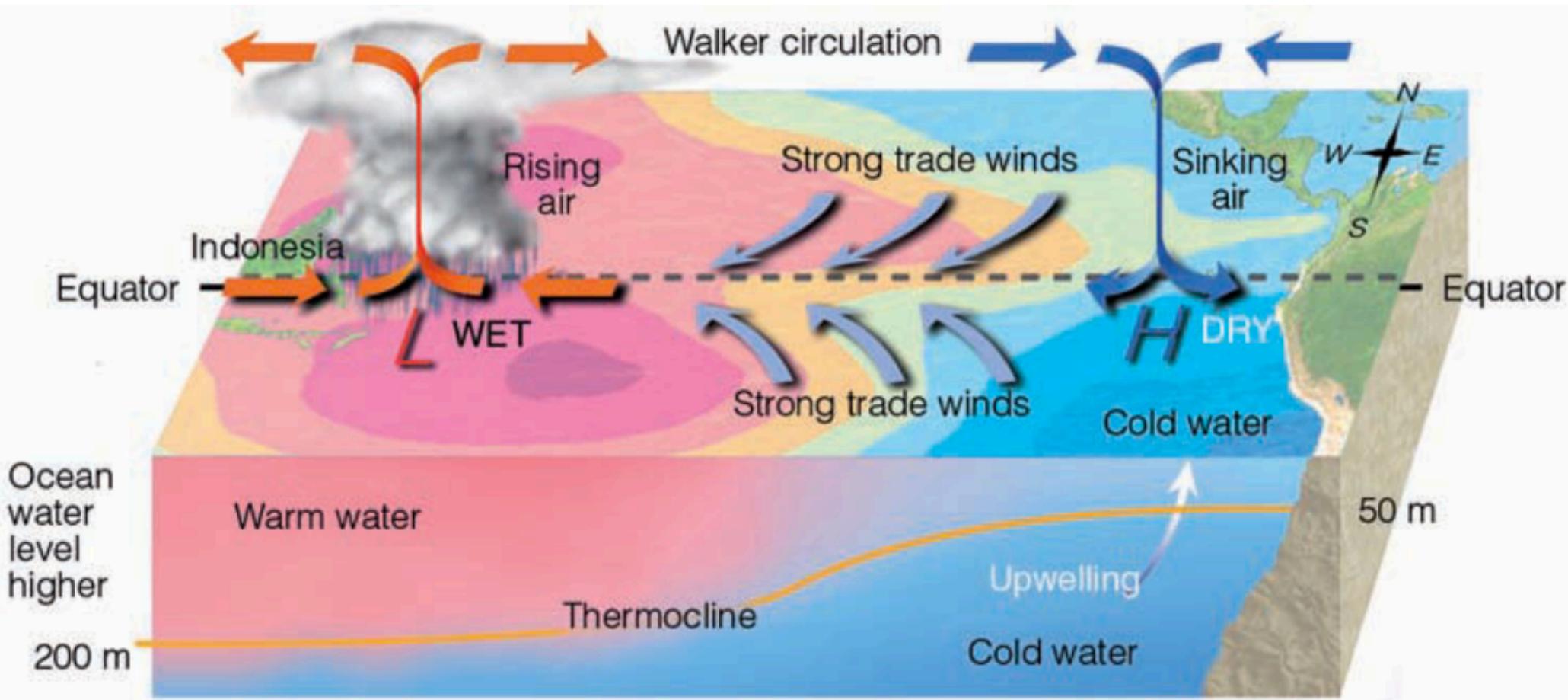
Το **ENSO** αποτελεί τη σημαντικότερη **ωκεάνια/ατμοσφαιρική κύμανση**, η οποία λαμβάνει χώρα στον **Ειρηνικό Ωκεανό**, στην περιοχή του ισημερινού, μεταξύ των ακτών του **Περού** (ανατολικά) και της **Ινδονησία** (δυτικά).

Το **ENSO** αποτελεί μία κύμανση η οποία εισάγει **σημαντική μεταβλητότητα** στο παγκόσμιο κλιματικό σύστημα, έχοντας **περίοδο μεταξύ 2 και 7 ετών**.

2.3 Μηχανισμοί εσωτερικής επιβολής του κλίματος

[2]

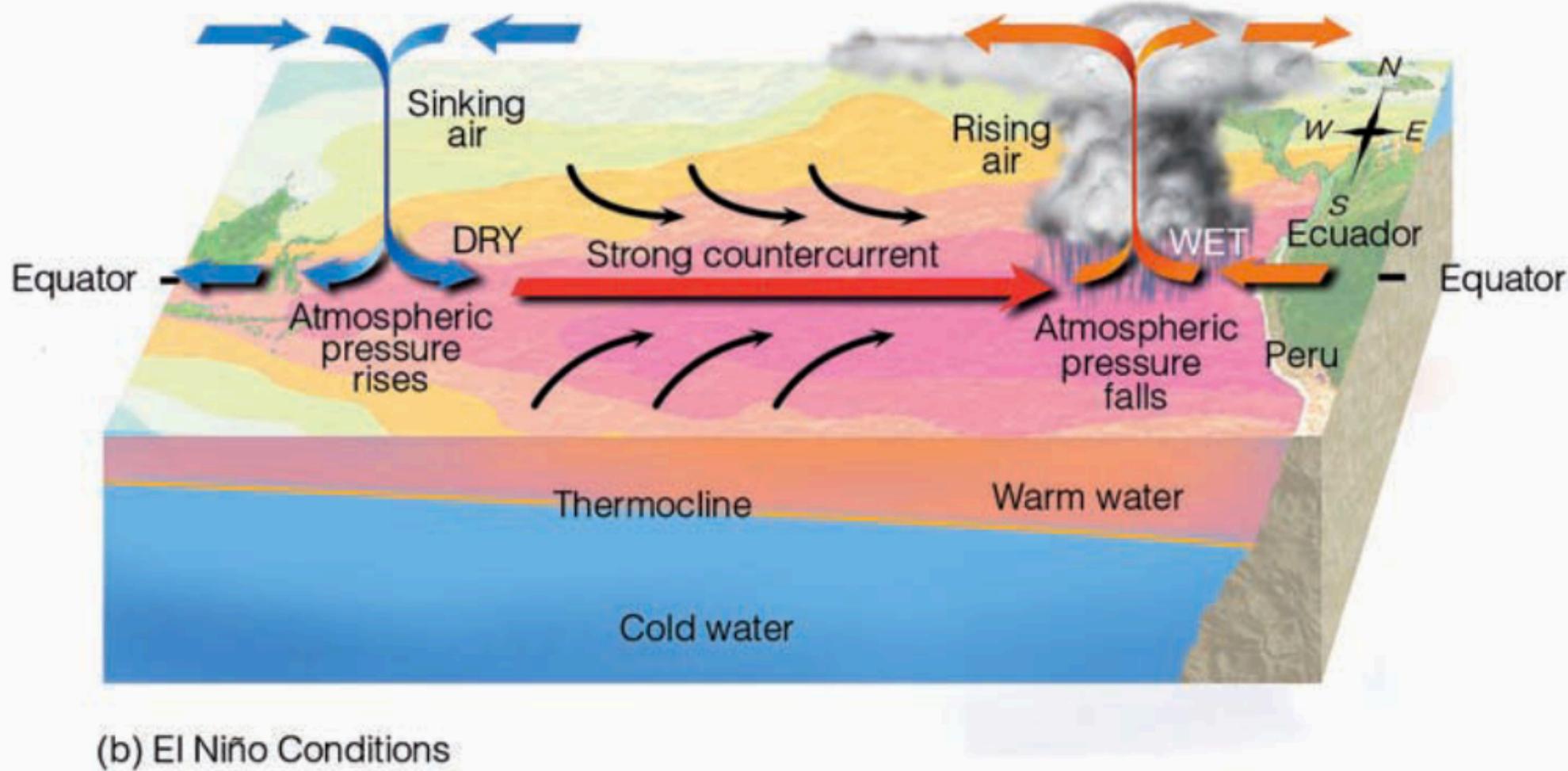
ENSO - Φυσιολογικές συνθήκες - La Niña



2.3 Μηχανισμοί εσωτερικής επιβολής του κλίματος

[3]

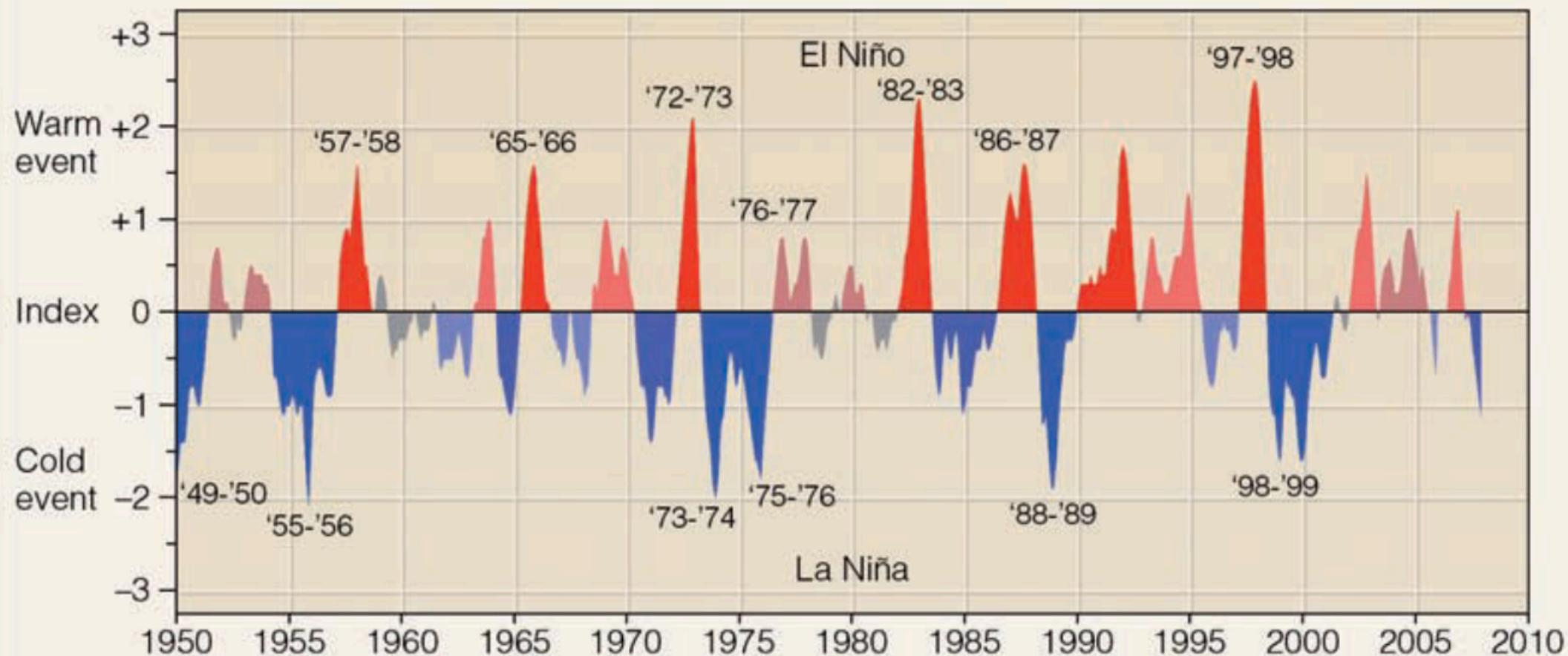
ENSO - Συνθήκες El Niño



2.3 Μηχανισμοί εσωτερικής επιβολής του κλίματος

[4]

ENSO - Παρακολούθηση

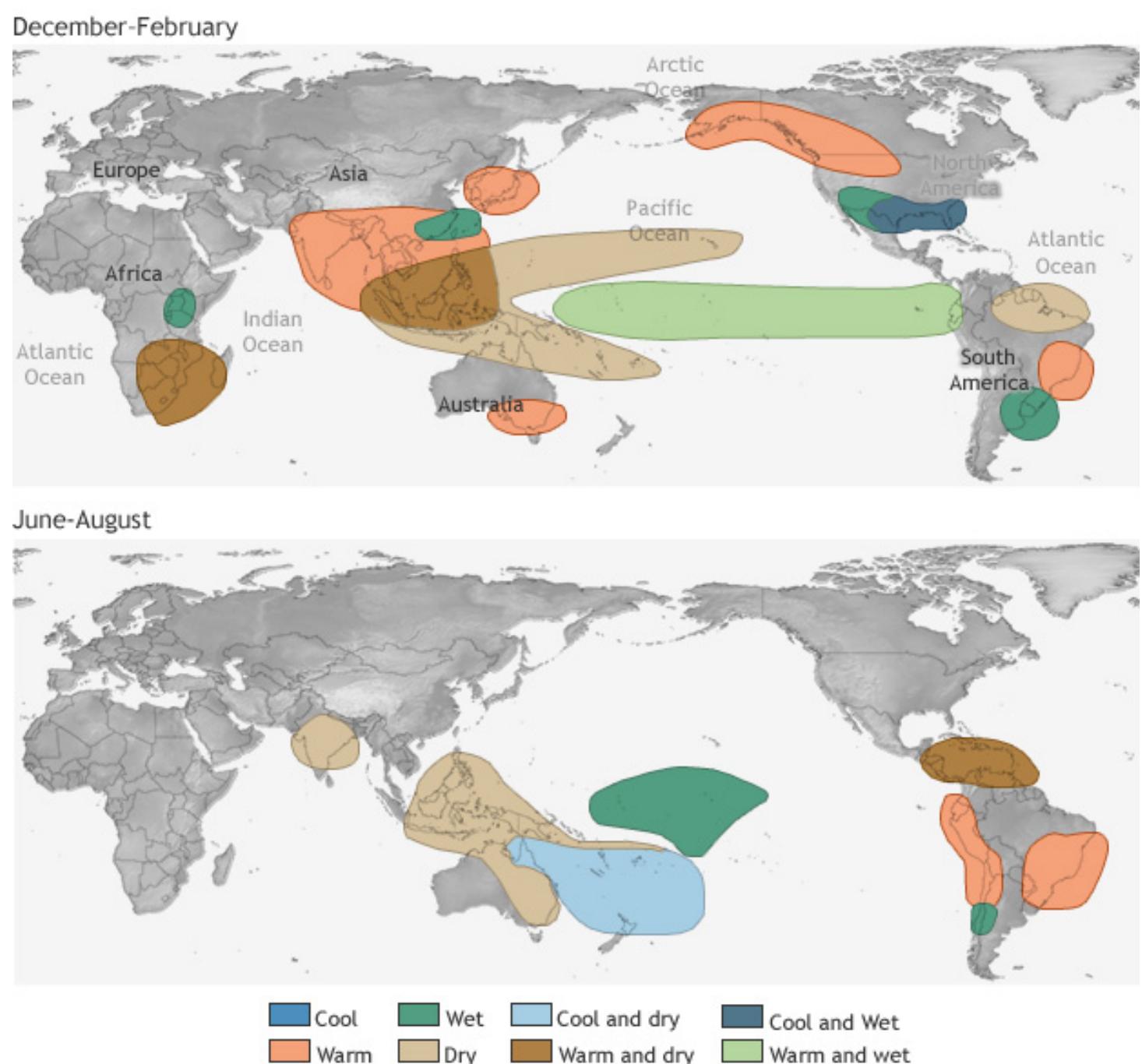


- Αποκλίσεις της θερμοκρασίας της επιφάνειας της θάλασσας
- Αποκλίσεις στη διαφορά πίεσης μεταξύ ανατολικών (Easter Island) και δυτικών (Darwin, Australia) ακτών του Ειρηνικού Ωκεανού

2.3 Μηχανισμοί εσωτερικής επιβολής του κλίματος

[5]

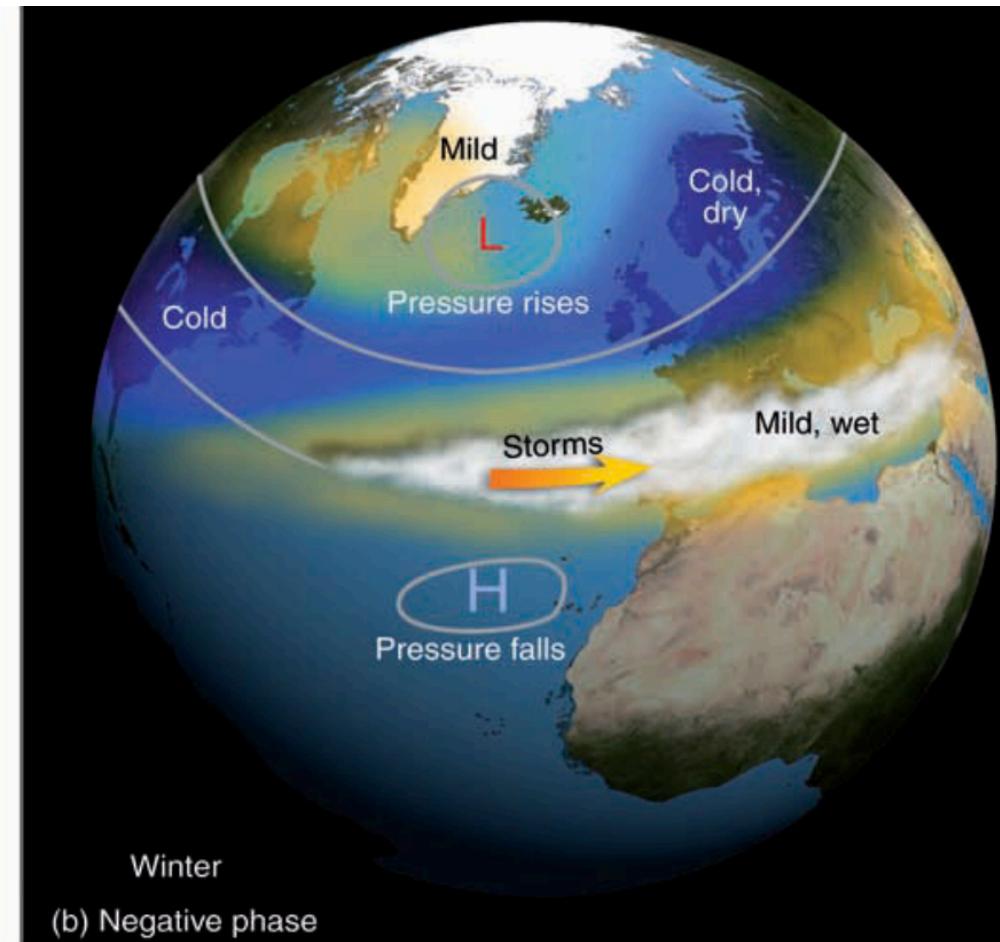
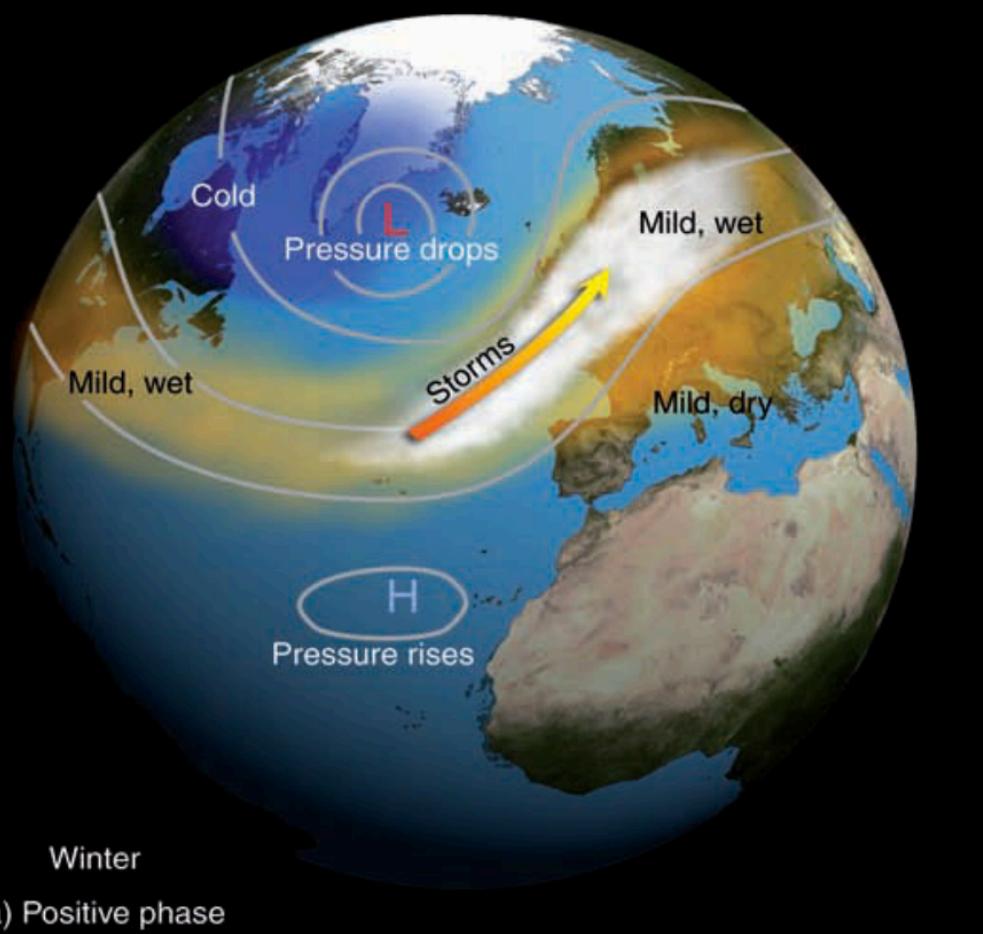
ENSO - Επιπτώσεις



2.3 Μηχανισμοί εσωτερικής επιβολής του κλίματος

[6]

Βόρειοατλαντική Κύμανση - North Atlantic Oscillation (NAO)

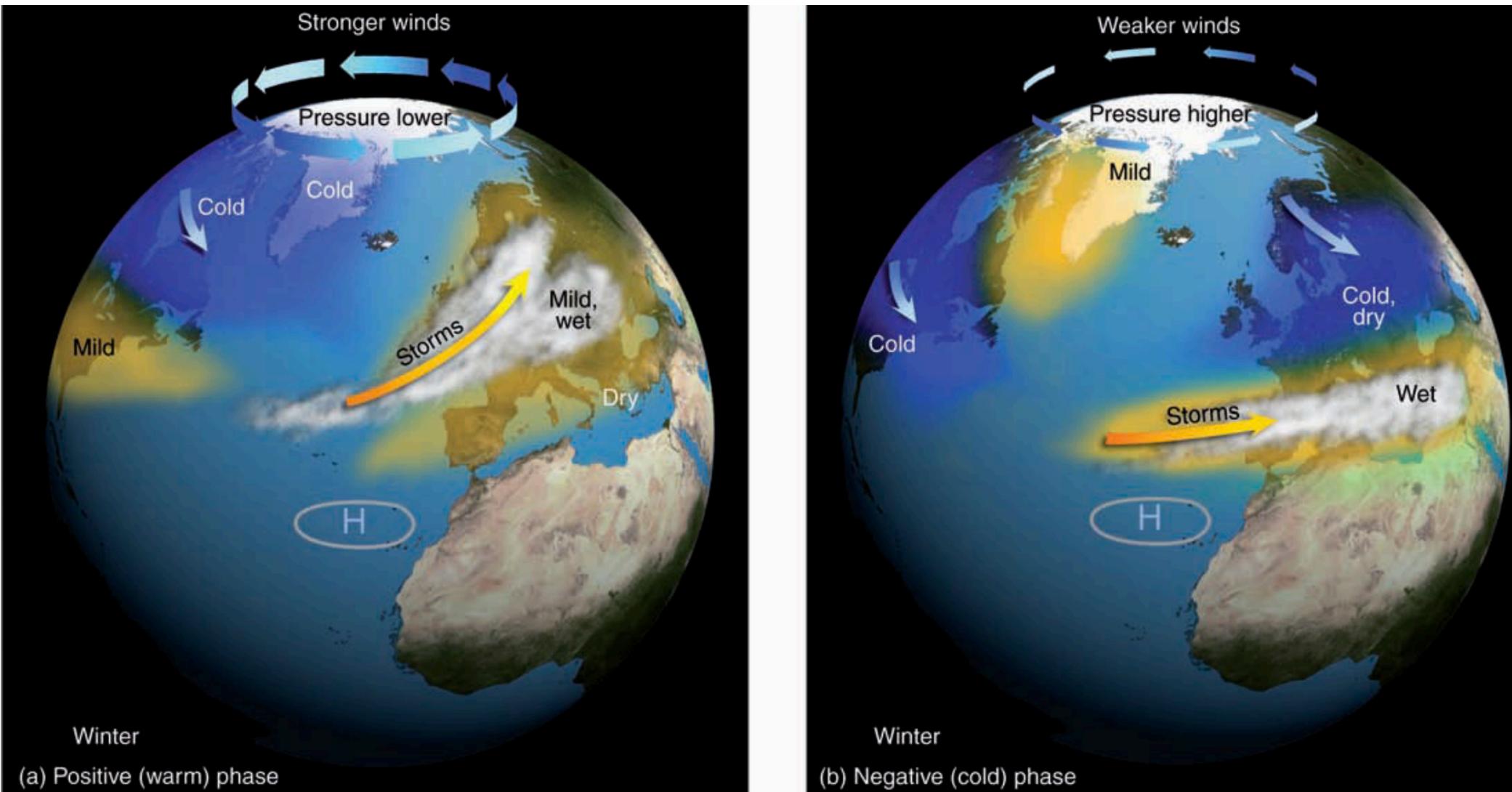


Η ΝΑΟ αποτελεί **ατμοσφαιρική κύμανση** του βορείου ημισφαιρίου, χαρακτηριζόμενη από **περιοδικές μεταβολές στη διαφορά πίεσης** μεταξύ του ημιμόνιμου **Ισλανδικού χαμηλού** και του ημιμόνιμου **αντικυκλώνα των Αζόρων**.

2.3 Μηχανισμοί εσωτερικής επιβολής του κλίματος

[7]

Αρκτική Κύμαση - Arctic Oscillation (AO)



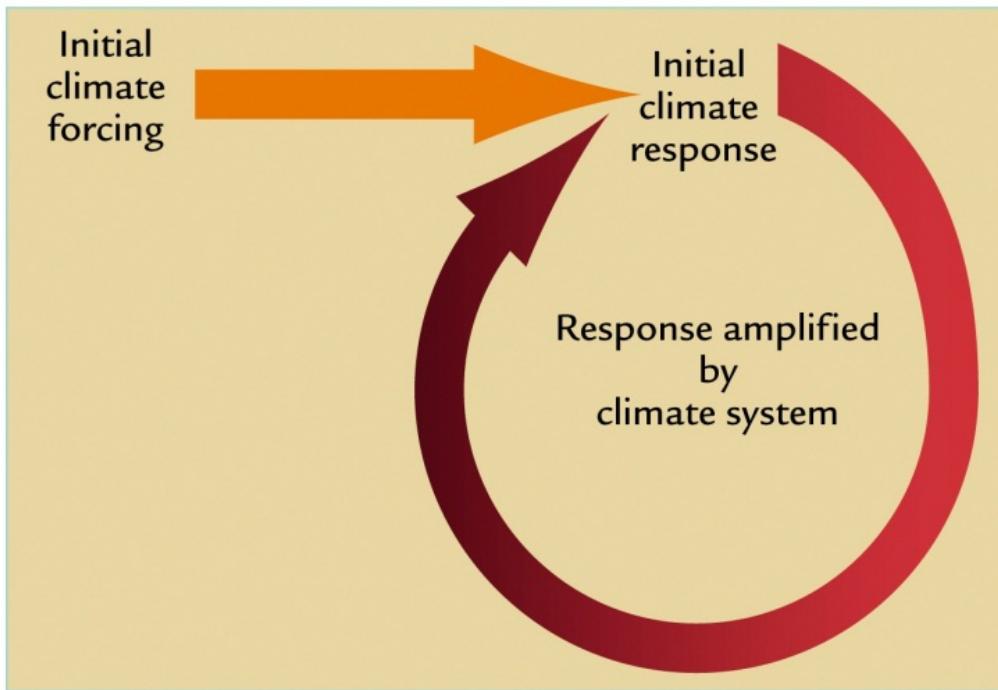
Η ΑΟ αποτελεί **ατμοσφαιρική κύμαση** του βορείου ημισφαιρίου, χαρακτηριζόμενη από **περιοδικές μεταβολές** στην ένταση του **πολικού στροβίλου**.

2.4 Κλιματικές αναδράσεις

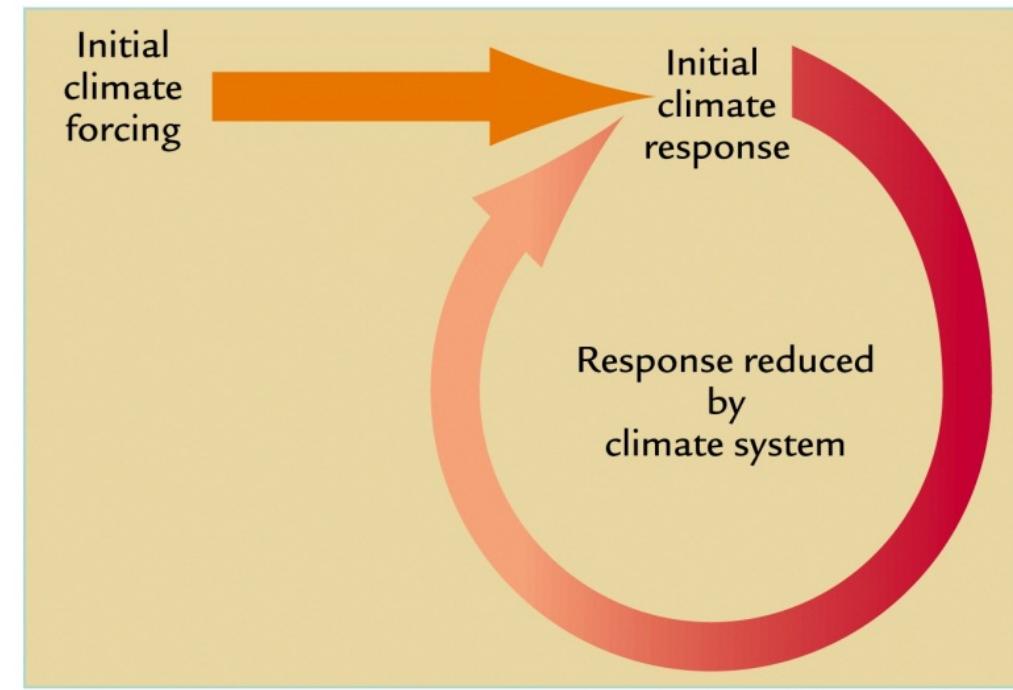
[1]

Κλιματική ανάδραση: Ο μηχανισμός μέσω του οποίου η **απόκριση** του κλιματικού συστήματος σε μία **αρχική μεταβολή** μιας ορισμένης διεργασίας τείνει:

- να **ενισχύσει** την αρχική μεταβολή (**Θετική** ανάδραση)
- να **αναιρέσει** την αρχική μεταβολή (**αρνητική** ανάδραση)



A Positive feedback



B Negative feedback

2.4 Κλιματικές αναδράσεις

[2]

Παράδειγμα: Πολικές περιοχές

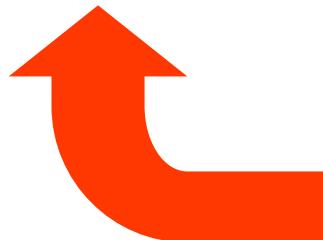


2.4 Κλιματικές αναδράσεις

[3]

Θετική ανάδραση

Ελάττωση του albedo, αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας



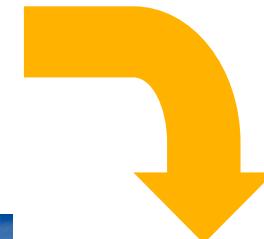
Εισροή περισσότερης ενέργειας στο σύστημα



Τήξη πάγου και χιονιού



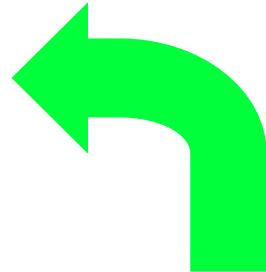
Αύξηση της θερμοκρασίας



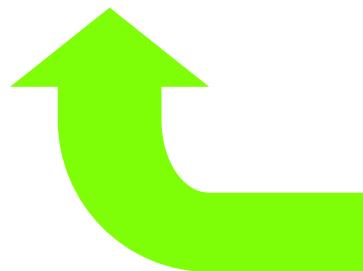
2.4 Κλιματικές αναδράσεις

[4]

Αρνητική ανάδραση



Αύξηση του albedo,
ε λάττωση της
απορροφούμενης
ενέργειας



Εισροή περισσότερης
ενέργειας στο
σύστημα



Αύξηση της
θερμοκρασίας



Ενίσχυση της
εξάτμισης, αύξηση της
νεφοκάλυψης

2.5 Οι κλιματικές αναδράσεις των νεφών

[1]



Η παρουσία υψηλών νεφών έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της διεργασίας ψύξης της επιφάνειας.

2.5 Οι κλιματικές αναδράσεις των νεφών

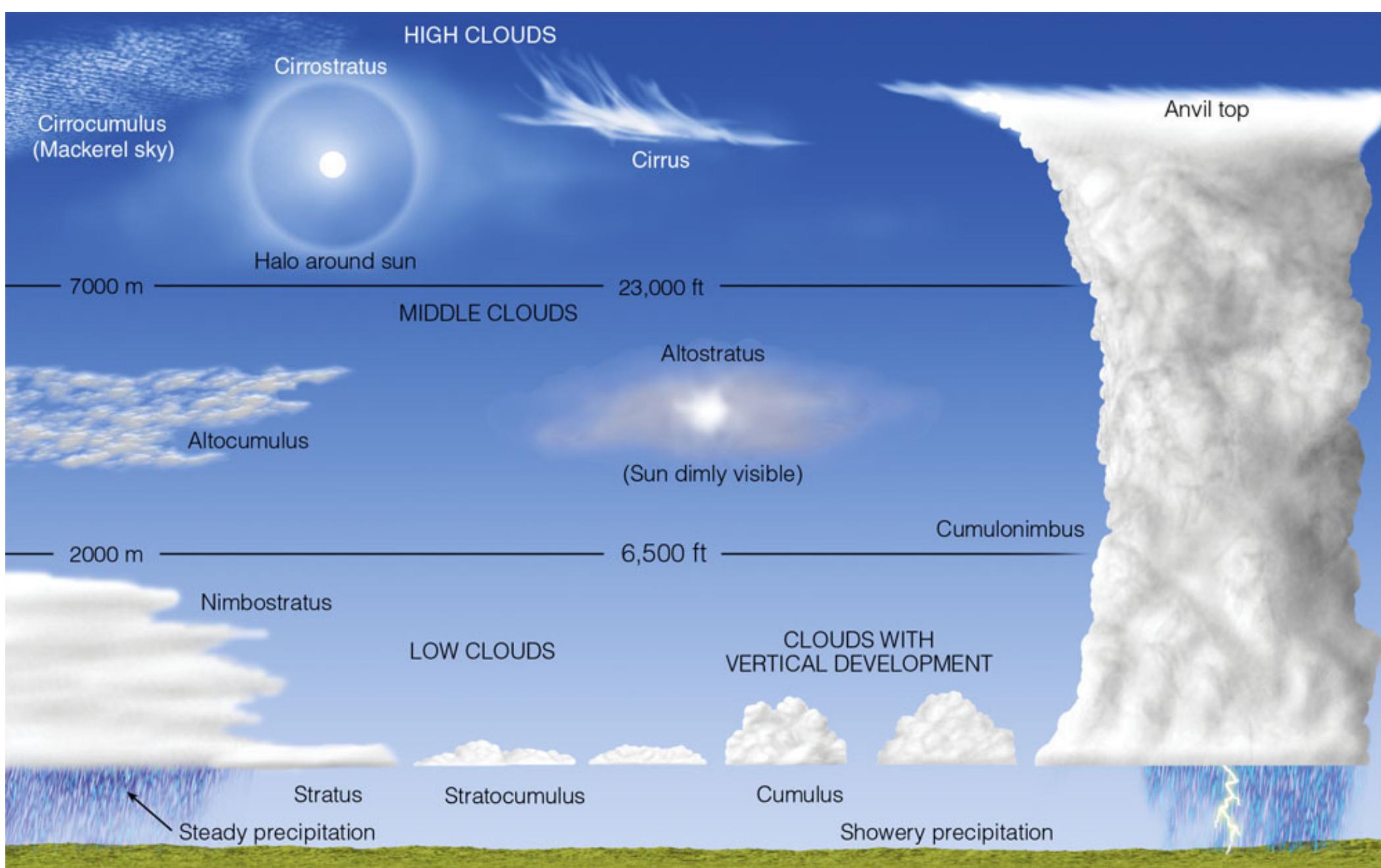
[2]



Αντίθετα, η παρουσία χαμηλών νεφών έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση της ψύξης της επιφάνειας.

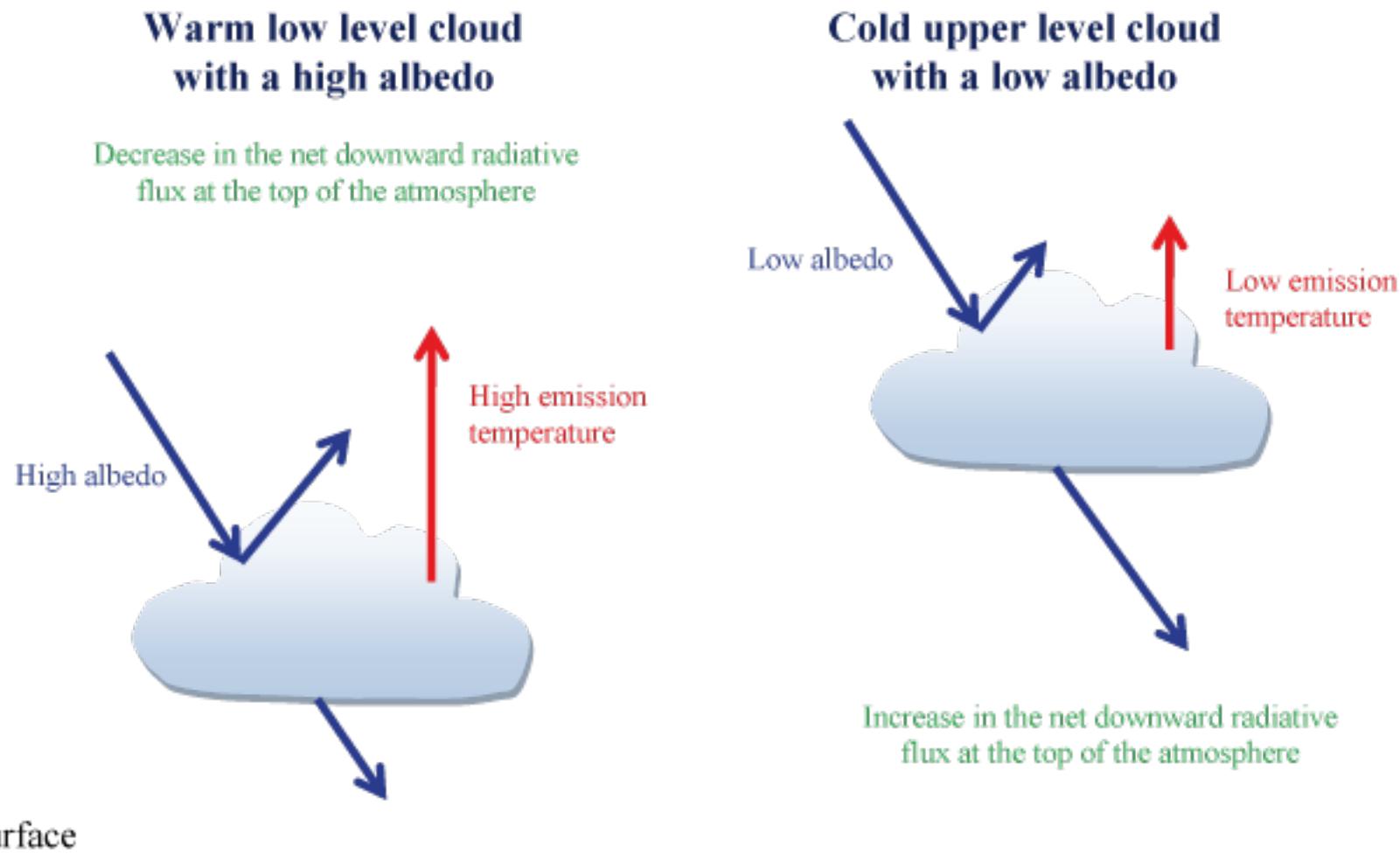
2.5 Οι κλιματικές αναδράσεις των νεφών

[3]



2.5 Οι κλιματικές αναδράσεις των νεφών

[4]



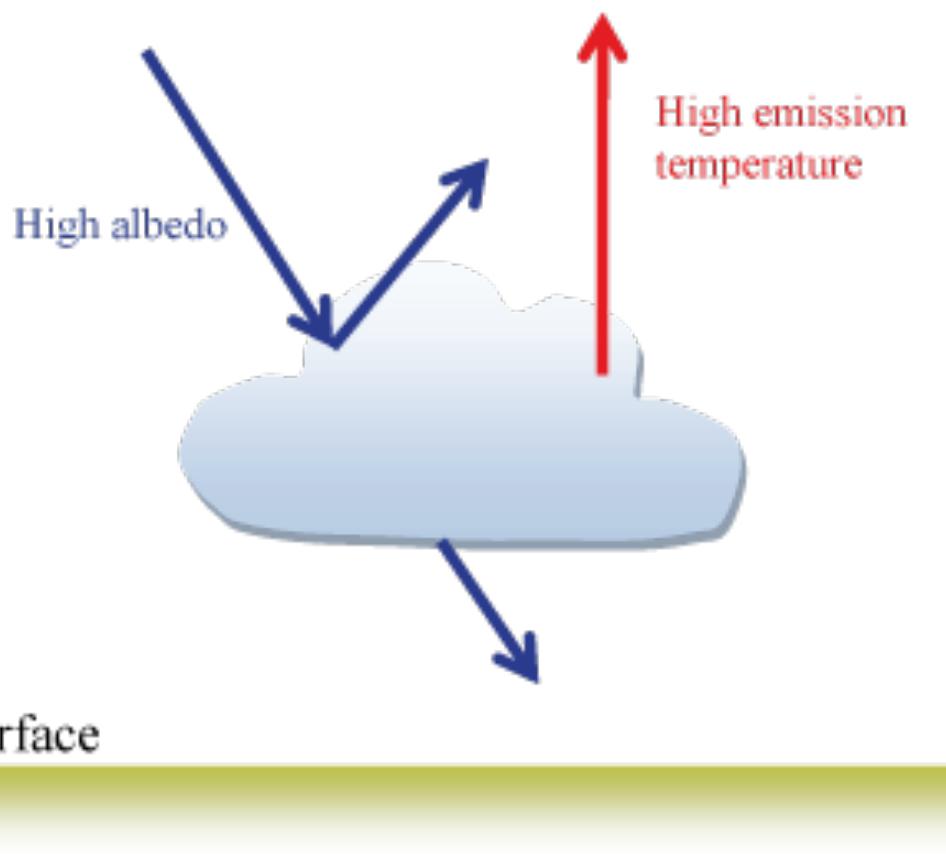
Τα **νέφη** και οι **κλιματικές τους αναδράσεις** παίζουν **κυρίαρχο ρόλο** στη διαμόρφωση του κλίματος της Γης, αλλά και στα πλαίσια της κλιματικής αλλαγής. Καλύπτουν, άλλωστε, το **50-60%** της ατμόσφαιρας, οπότε και αποτελούν ένα **βασικό ρυθμιστή της διάδοσης τόσο της ηλιακής όσο και της γήινης ακτινοβολίας**.

2.5 Οι κλιματικές αναδράσεις των νεφών

[5]

Warm low level cloud with a high albedo

Decrease in the net downward radiative
flux at the top of the atmosphere



Χαμηλά νέφη

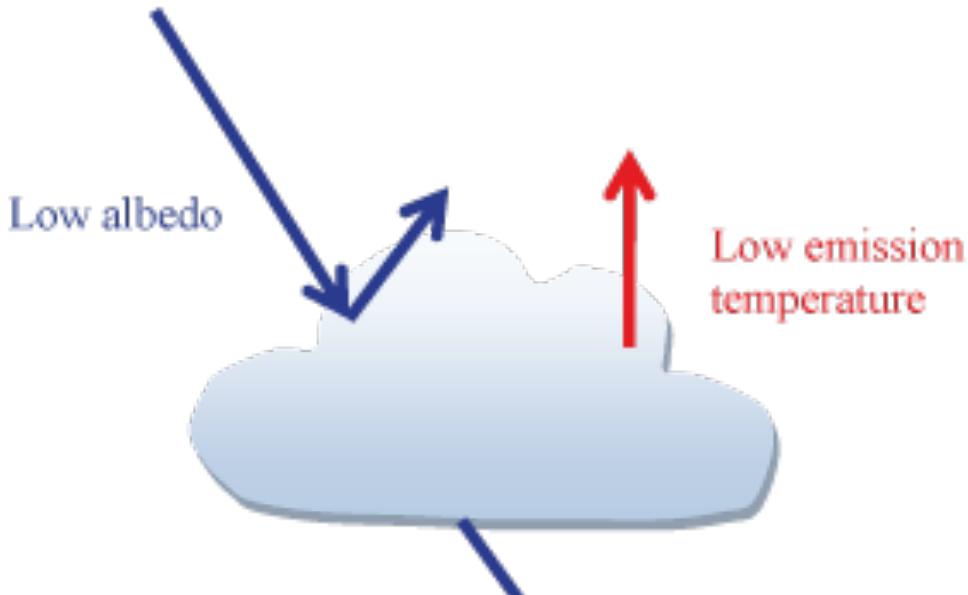
- **Υψηλή** θερμοκρασία, επομένως ικανοί εκπομποί υπέρυθρης (IR) ακτινοβολίας (**ψύξη**).
- **Υψηλό** albedo, επομένως ικανοί ανακλαστήρες της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας (**ψύξη**)

Συνολικά, τα **χαμηλά νέφη** επιφέρουν **ψύξη** του συστήματος Γη-Ατμόσφαιρα.

2.5 Οι κλιματικές αναδράσεις των νεφών

[6]

Cold upper level cloud with a low albedo



Increase in the net downward radiative
flux at the top of the atmosphere

Υψηλά νέφη

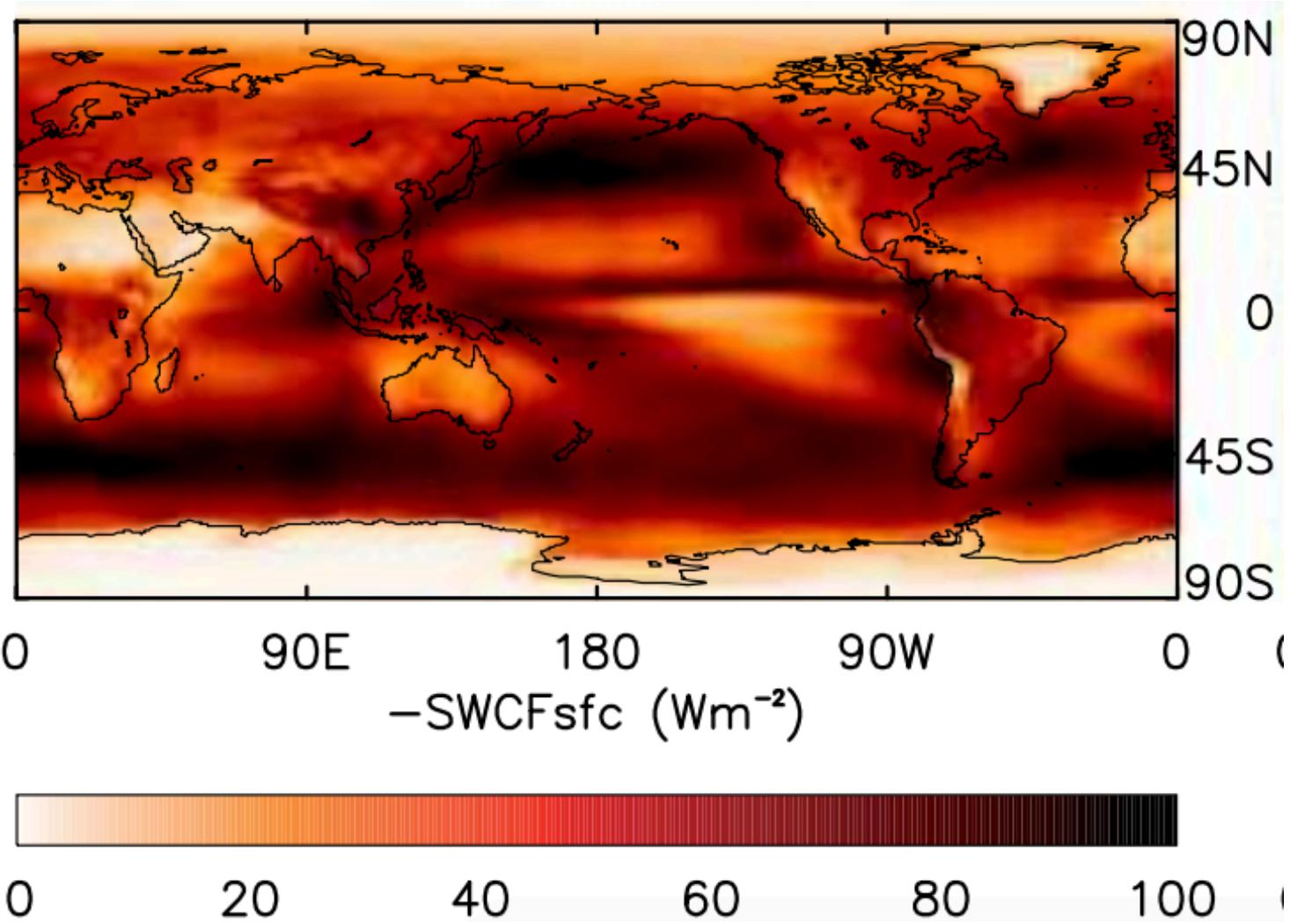
- **Χαμηλή** θερμοκρασία, επομένως μικρή εκπομπή υπέρυθρης (IR) ακτινοβολίας (**Θέρμανση**).
- **Χαμηλό** albedo, επομένως μικρή ανάκλαση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας (**Θέρμανση**)

Συνολικά, τα **υψηλά νέφη** επιφέρουν **θέρμανση** του συστήματος Γη-Ατμόσφαιρα.

2.5 Οι κλιματικές αναδράσεις των νεφών

[7]

surface

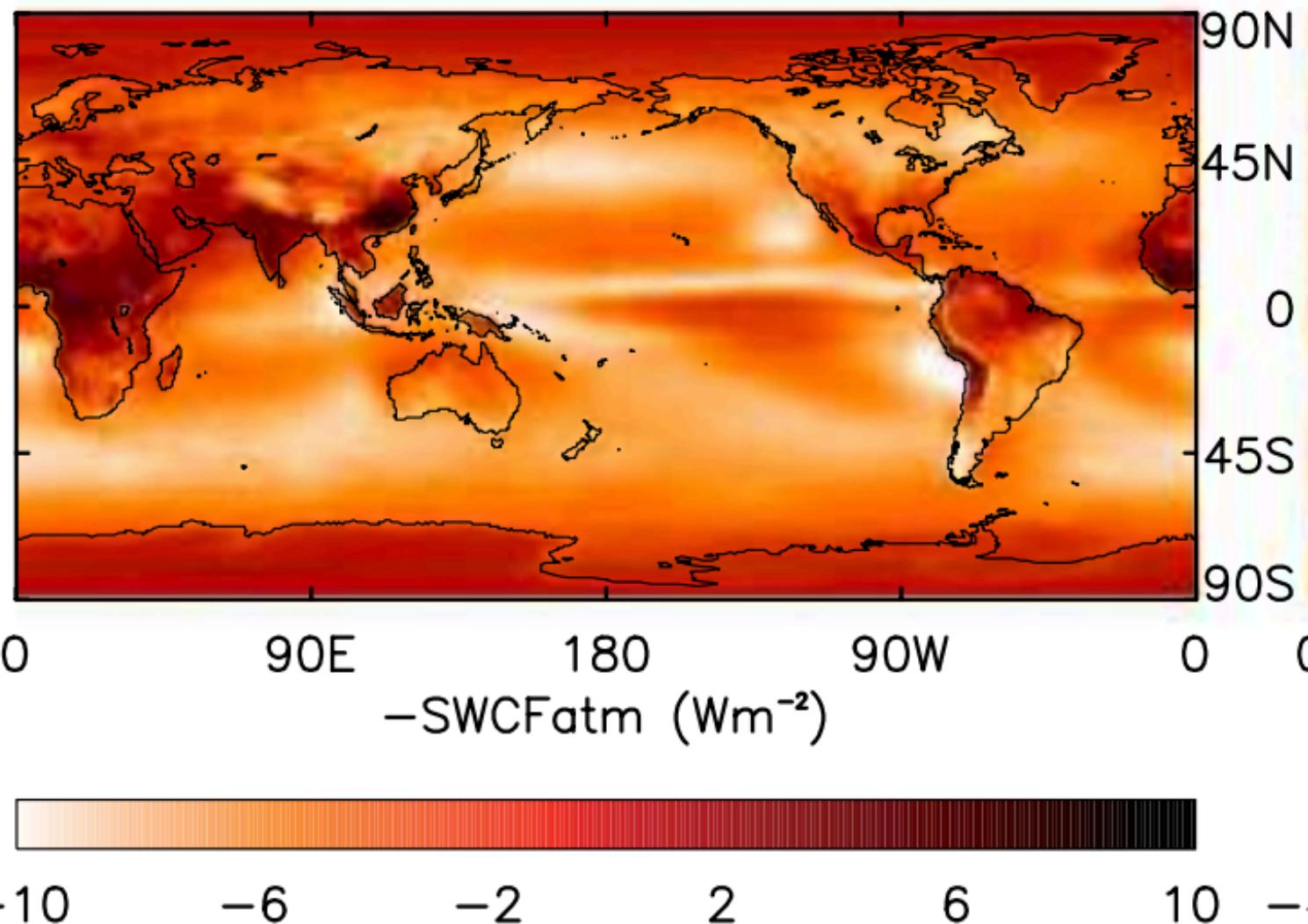


Allan et al. (2011)

Η **αλληλεπίδραση** των **νεφών** με την **ηλιακή** ακτινοβολία οδηγεί σε **ψύξη** της επιφάνειας της Γης, η οποία μπορεί να φτάσει σε μέγεθος τα **100 W m⁻²**. Η ψύξη είναι **εντονότερη** στους **τροπικούς** και τα **μέσα γεωγραφικά πλάτη** και μικρότερη στις υποτροπικές περιοχές. Γιατί;

2.5 Οι κλιματικές αναδράσεις των νεφών

[8]

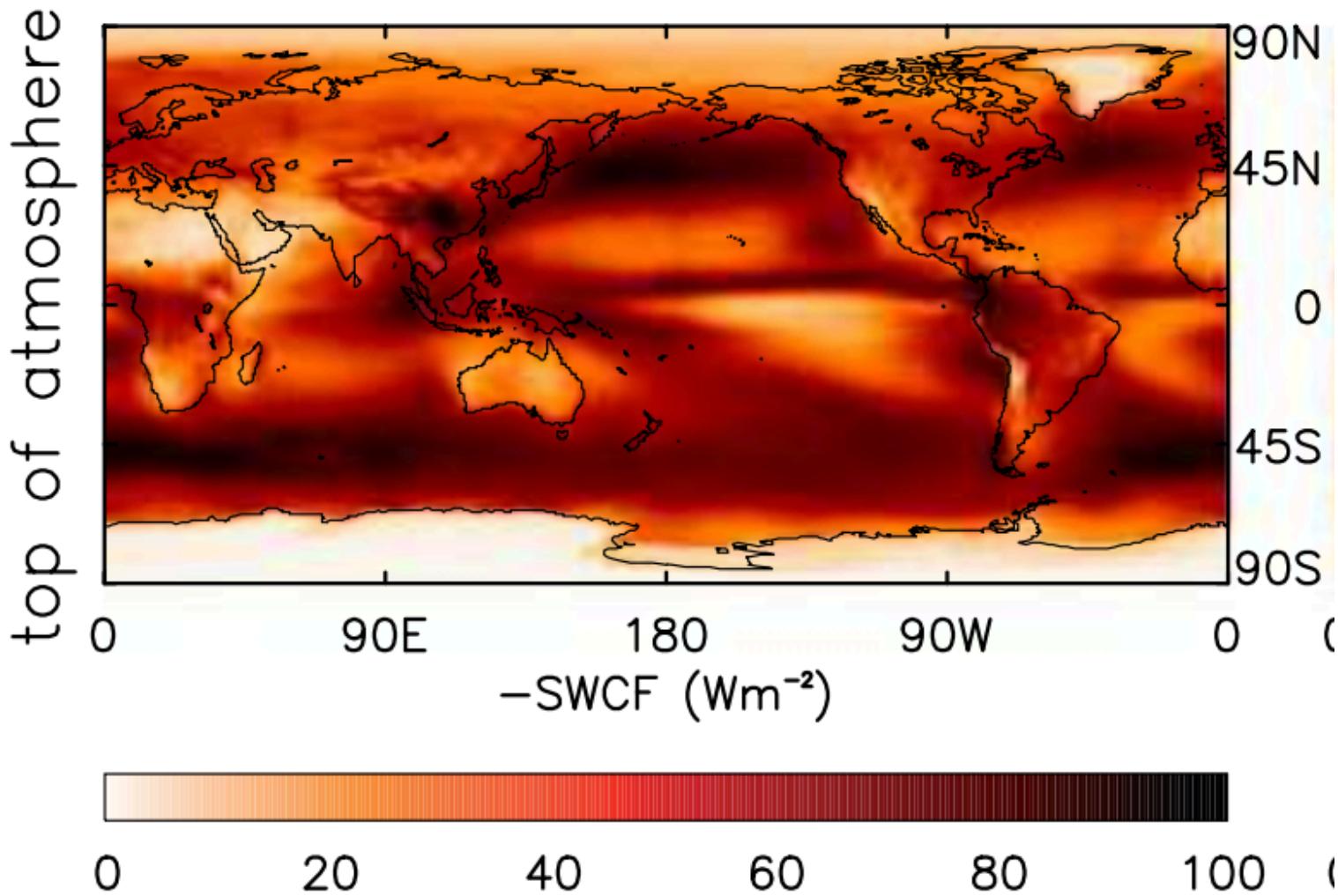


Allan et al. (2011)

Η **αλληλεπίδραση** των **νεφών** με την **ηλιακή** ακτινοβολία οδηγεί σε **θέρμανση** της **ατμόσφαιρας** της Γης, η οποία είναι κατά κανόνα μικρή (~ **+10 W m⁻²**).

2.5 Οι κλιματικές αναδράσεις των νεφών

[9]

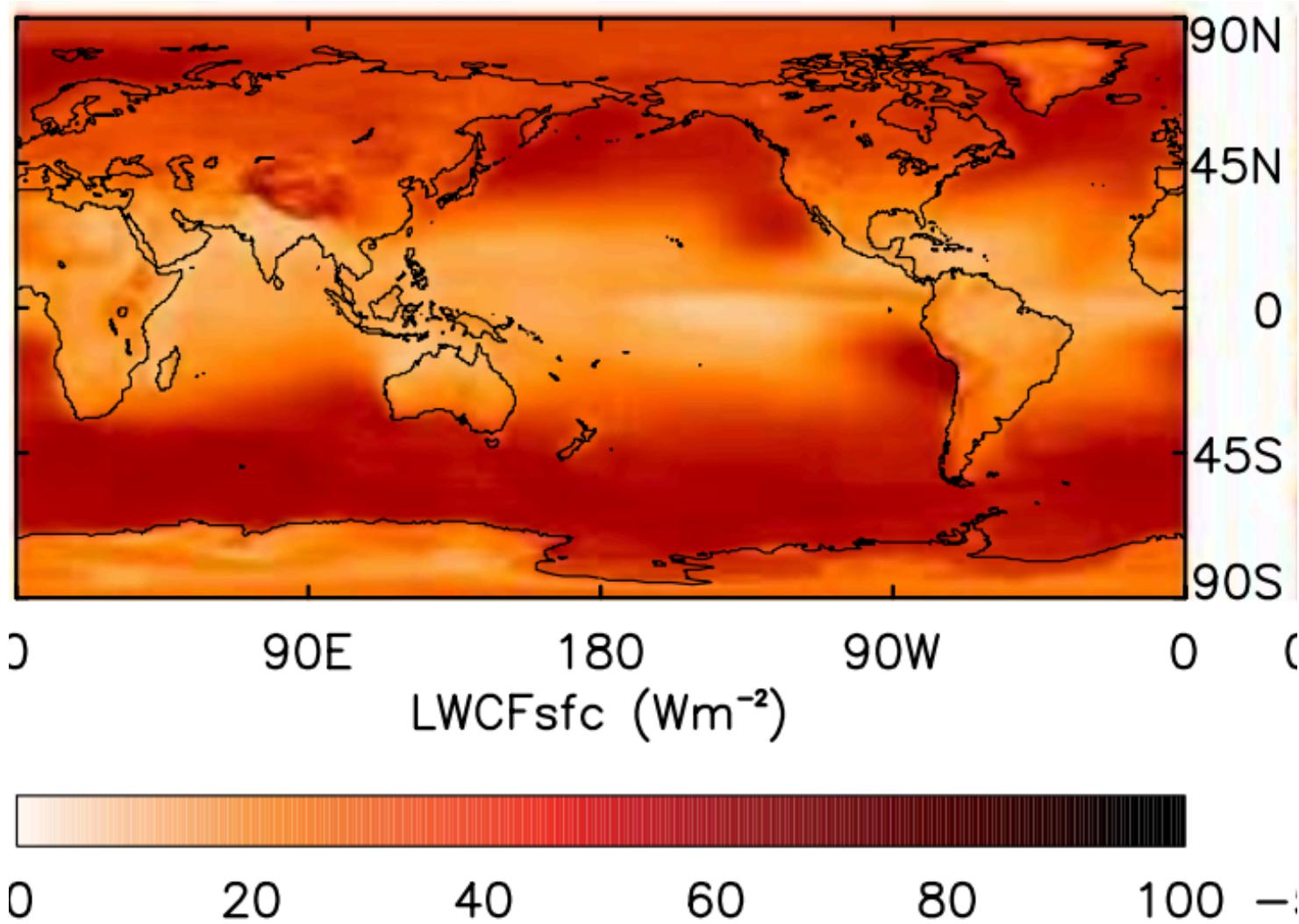


Allan et al. (2011)

Η **αλληλεπίδραση** των **νεφών** με την **ηλιακή** ακτινοβολία οδηγεί συνολικά σε **ψύξη** του συστήματος **Γη-Ατμόσφαιρα**, της τάξης των **-100 W m^{-2}** .

2.5 Οι κλιματικές αναδράσεις των νεφών

[10]

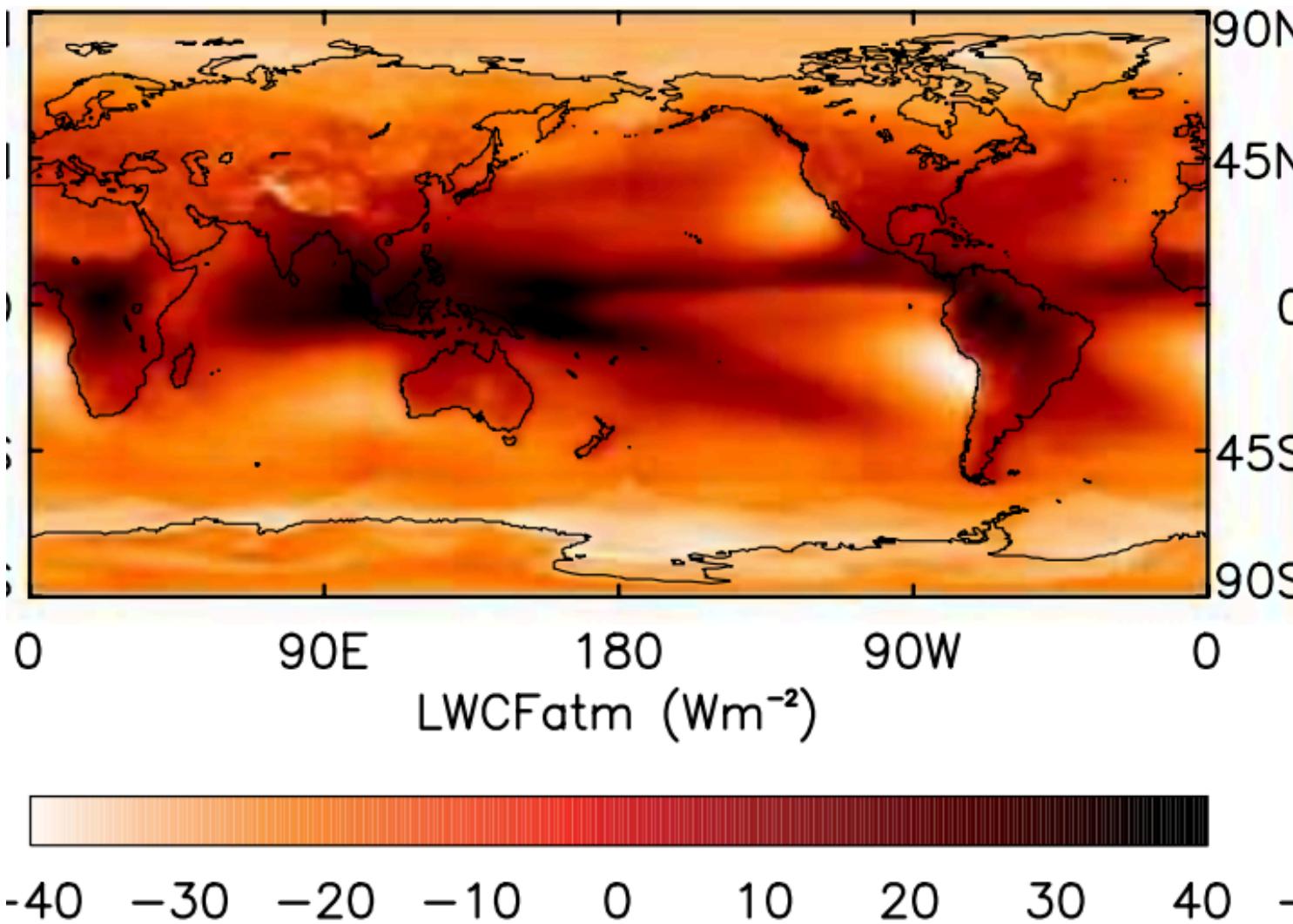


Allan et al. (2011)

Η αλληλεπίδραση των νεφών με την γήινη ακτινοβολία οδηγεί σε θέρμανση της επιφάνειας της Γης, η οποία είναι γενικά μικρότερη από την ψύξη που επιφέρει η αλληλεπίδραση μεταξύ των νεφών και της ηλιακής ακτινοβολίας.

2.5 Οι κλιματικές αναδράσεις των νεφών

[11]

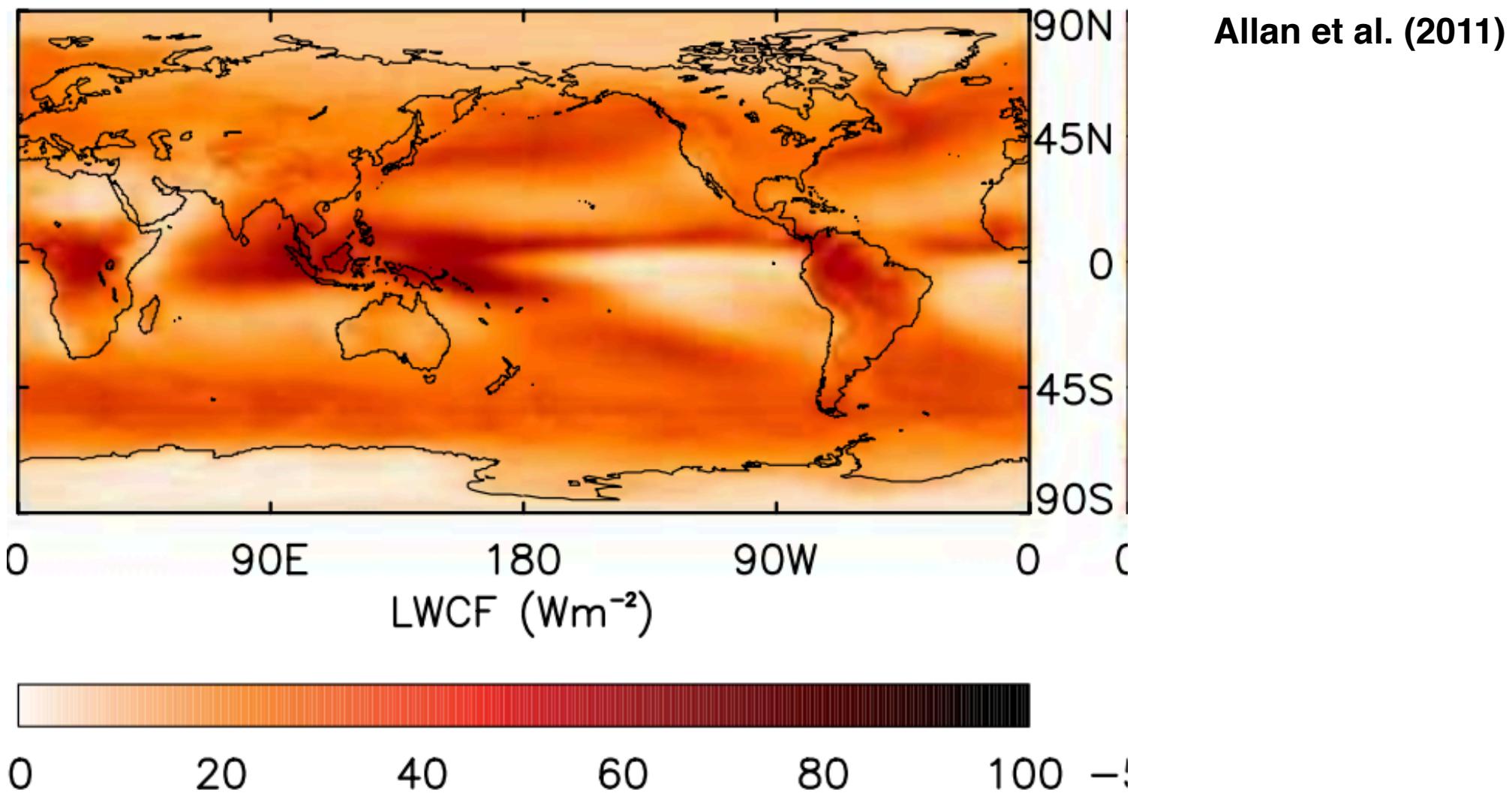


Allan et al. (2011)

Η **αλληλεπίδραση** των **νεφών** με την **γήινη** ακτινοβολία οδηγεί, κατά κανόνα, σε **ψύξη** της **ατμόσφαιρας** της Γης. Ωστόσο, στην περιοχή των **τροπικών** παρατηρείται **θέρμανση** της ατμόσφαιρας. **Γιατί;**

2.5 Οι κλιματικές αναδράσεις των νεφών

[12]



Η **αλληλεπίδραση** των **νεφών** με τη **γήινη** ακτινοβολία οδηγεί συνολικά σε **θέρμανση** του συστήματος **Γη-Ατμόσφαιρα**, η οποία είναι γενικά μικρότερη από την ψύξη που προκαλεί η αλληλεπίδραση μεταξύ νεφών και ηλιακής ακτινοβολίας.

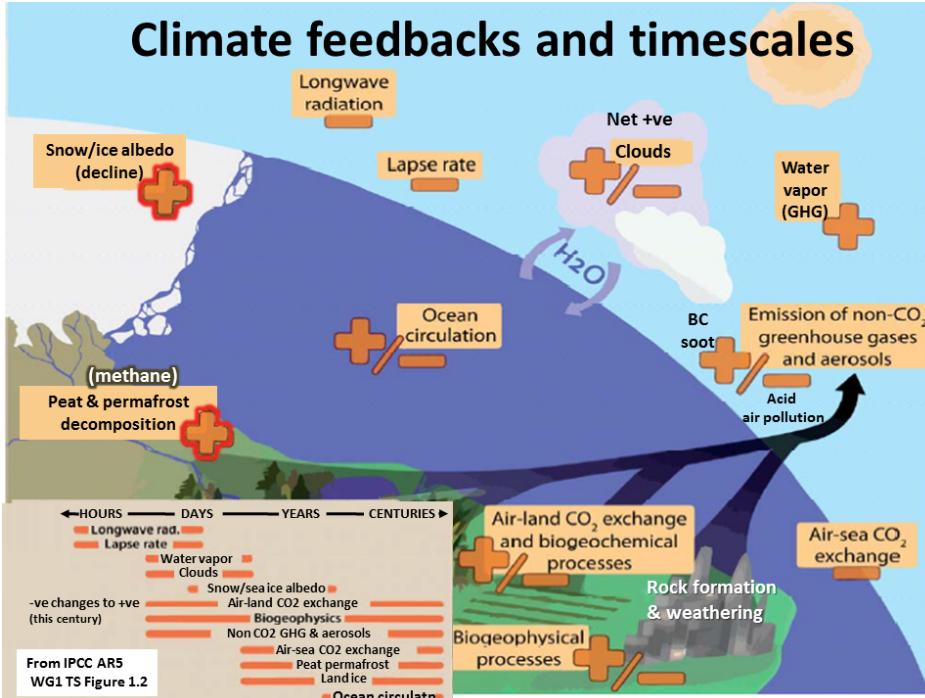
Συνοψίζοντας:

- Στην **επιφάνεια** της Γης κυριαρχεί η επίδραση των νεφών στην **ηλιακή** ακτινοβολία, με το συνολικό “μέσο αποτέλεσμα” να είναι η **ψύξη**.
- Στην **ατμόσφαιρα** της Γης κυριαρχεί η επίδραση των νεφών στη **γήινη** ακτινοβολία, με το συνολικό “μέσο αποτέλεσμα” να είναι η **ψύξη** της ατμόσφαιρας στα **μέσα και μεγάλα** γεωγραφικά πλάτη και η **θέρμανση** της στην περιοχή του **ισημερινού**.
- Σε **πλανητική κλίμακα**, για το σύστημα Γη-Ατμόσφαιρα, κυριαρχεί η αλληλεπίδραση των νεφών με την **ηλιακή** ακτινοβολία, με το “μέσο αποτέλεσμα” να είναι η **ψύξη** του συστήματος.

Ωστόσο, οι κλιματικές αναδράσεις των νεφών:

- παρουσιάζουν σημαντικές **γεωγραφικές μεταβολές**
- είναι εξαιρετικά **ευαίσθητες** ακόμα και σε μικρές **μεταβολές** στη θέση και τα χαρακτηριστικά (**οπτικές ιδιότητες**) των νεφών

Σύνοψη



Το **κλίμα** της Γης χαρακτηρίζεται από σημαντική **φυσική μεταβλητότητα**, η οποία θα πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη στην προσπάθεια απόδοσης οποιασδήποτε μεταβολές στην ανθρωπογενή δραστηριότητα.

Σημαντικό ρόλο στην κατανόηση της κλιματικής αλλαγής και των επιπτώσεων της παίζει η κατανόηση των **αναδράσεων του κλιματικού συστήματος**.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα, καθώς και πεδίο έντονης ερευνητικής δραστηριότητας, αποτελούν τα **νέφη**, τα οποία δύνανται τόσο να **ψύξουν** όσο και να **θερμάνουν** το κλιματικό σύστημα του πλανήτη μας.

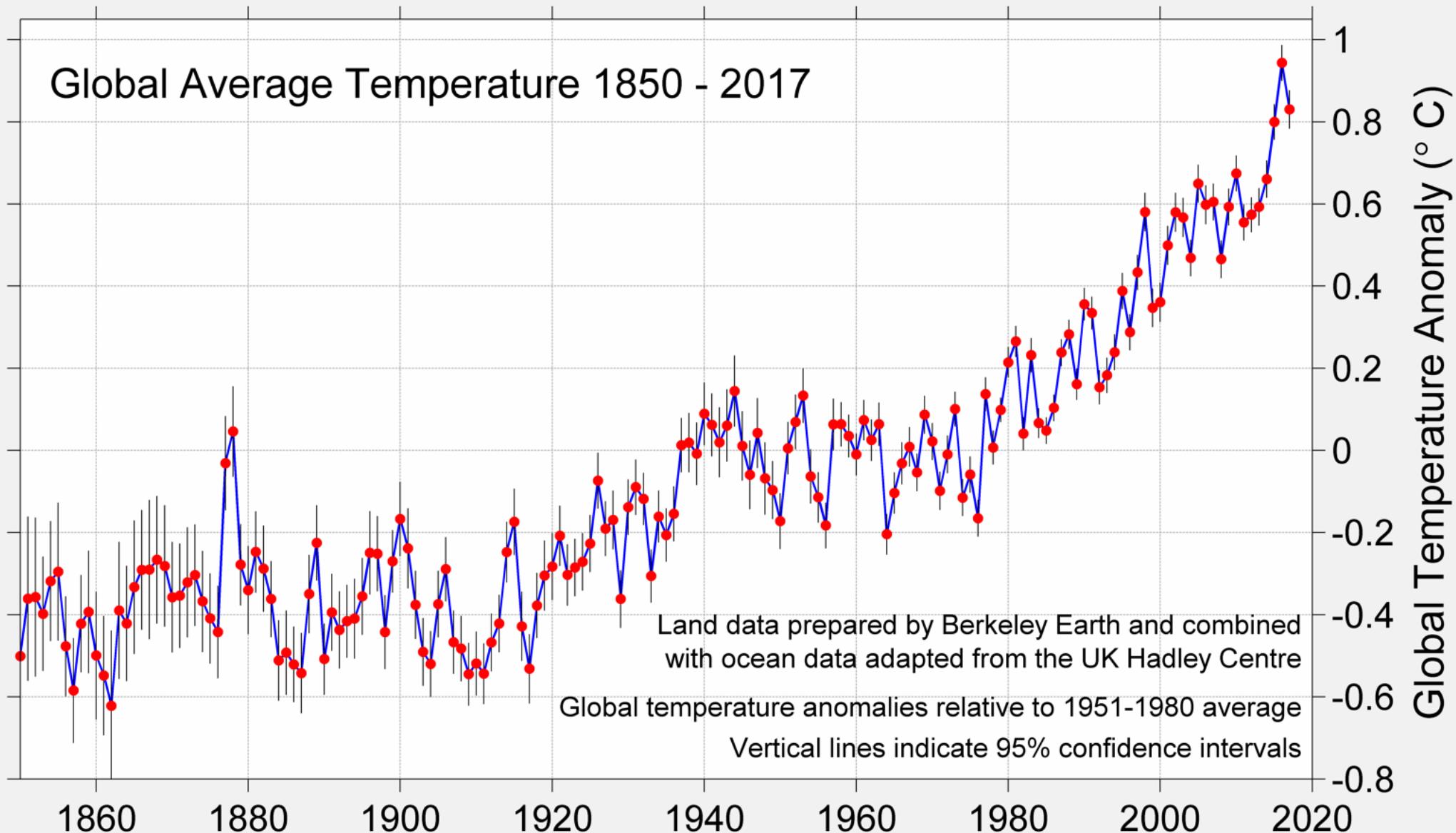
Δομή και στόχοι μαθήματος

Ενότητα 3: Η επίδραση του ανθρώπου στο κλίμα

- Παρατηρούμενες μεταβολές
- Η ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου
- Ο ρόλος των υδρατμών
- Ο ρόλος των αιωρούμενων σωματιδίων
- Η έννοια του radiative forcing
- Η κλιματική αλλαγή σήμερα
- Κλιματικά μοντέλα
- Η κλιματική αλλαγή στο μέλλον

3.1 Παρατηρούμενες μεταβολές

[1]



Αποκλίσεις της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας της Γης (ξηρά + ωκεανοί) για την περίοδο 1850 - 2017, με αναφορά την περίοδο 1951 - 1980.

3.1 Παρατηρούμενες μεταβολές

[2]

Annual Temperature Anomaly

Year	Rank	Relative to 1981-2010 Average		Relative to 1951-1980 Average	
		Anomaly in Degrees Celsius	Anomaly in Degrees Fahrenheit	Anomaly in Degrees Celsius	Anomaly in Degrees Fahrenheit
2017	2	0.47 ± 0.05	0.85 ± 0.08	0.83 ± 0.05	1.49 ± 0.08
2016	1	0.58 ± 0.04	1.05 ± 0.08	0.94 ± 0.04	1.70 ± 0.08
2015	3	0.44 ± 0.04	0.79 ± 0.08	0.80 ± 0.04	1.44 ± 0.08
2014	5	0.30 ± 0.05	0.54 ± 0.08	0.66 ± 0.05	1.19 ± 0.08
2013	9	0.23 ± 0.05	0.42 ± 0.08	0.59 ± 0.05	1.07 ± 0.08
2012	13	0.21 ± 0.04	0.38 ± 0.08	0.57 ± 0.04	1.03 ± 0.08
2011	15	0.20 ± 0.04	0.35 ± 0.08	0.56 ± 0.04	1.00 ± 0.08
2010	4	0.31 ± 0.04	0.57 ± 0.08	0.67 ± 0.04	1.21 ± 0.08

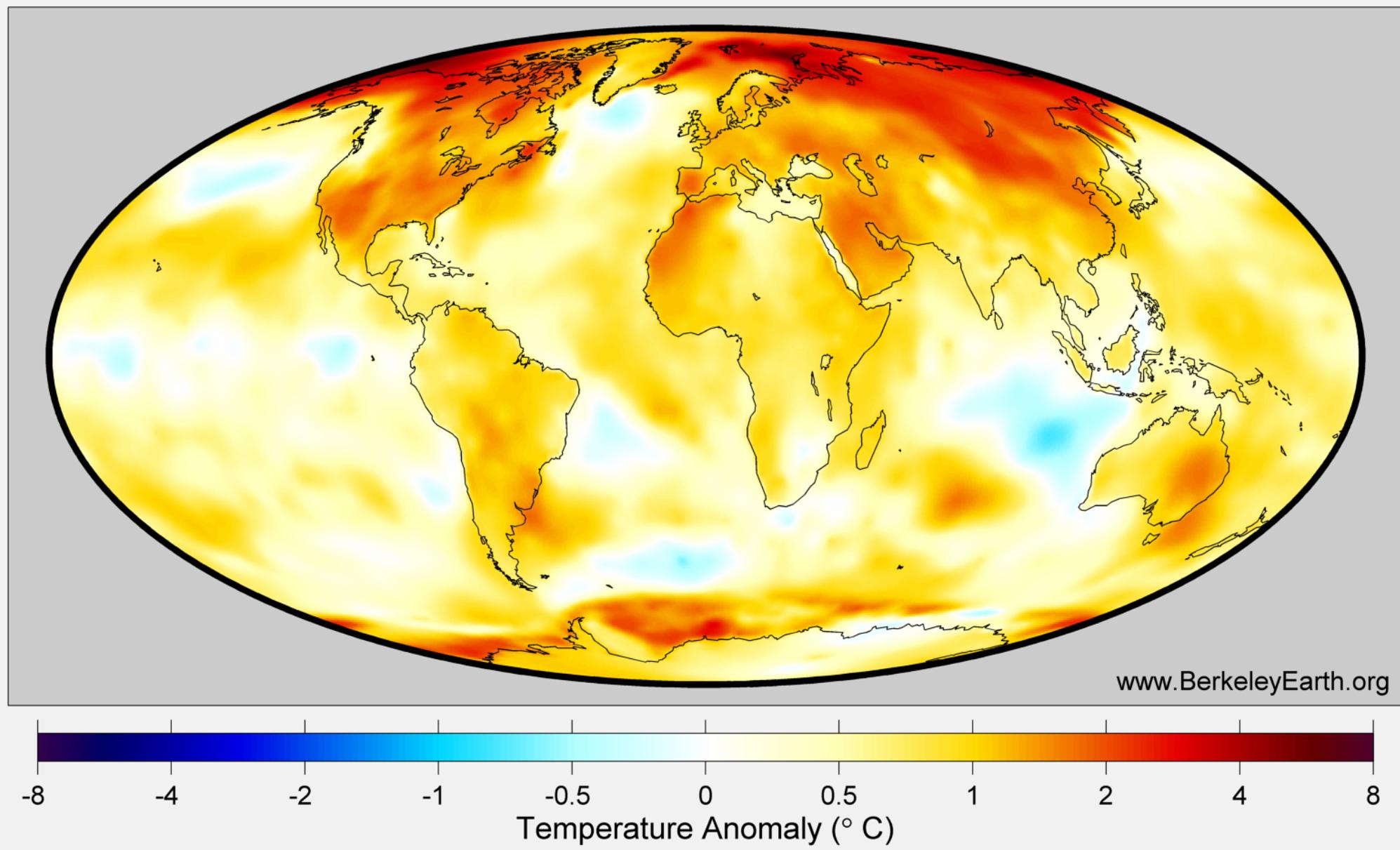
Uncertainties indicate 95% confidence range.

Το 2017 ήταν το **δεύτερο πιο θερμό** έτος από το 1850, με το 2016 να είναι, μέχρι στιγμής, το **θερμότερο έτος όλων των εποχών**.

3.1 Παρατηρούμενες μεταβολές

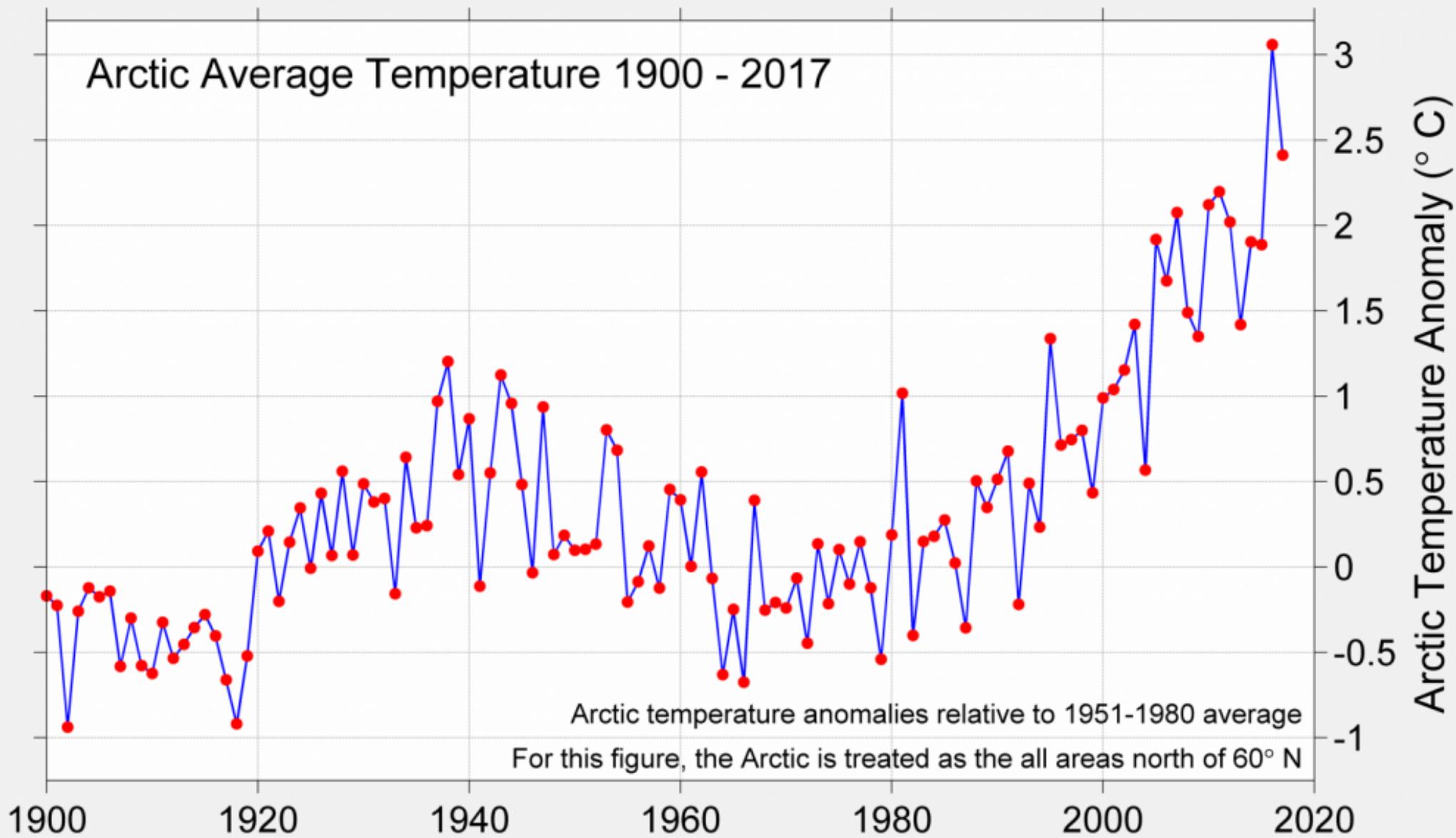
[3]

Annual Temperature in 2017 relative to 1951-1980 Averages



3.1 Παρατηρούμενες μεταβολές

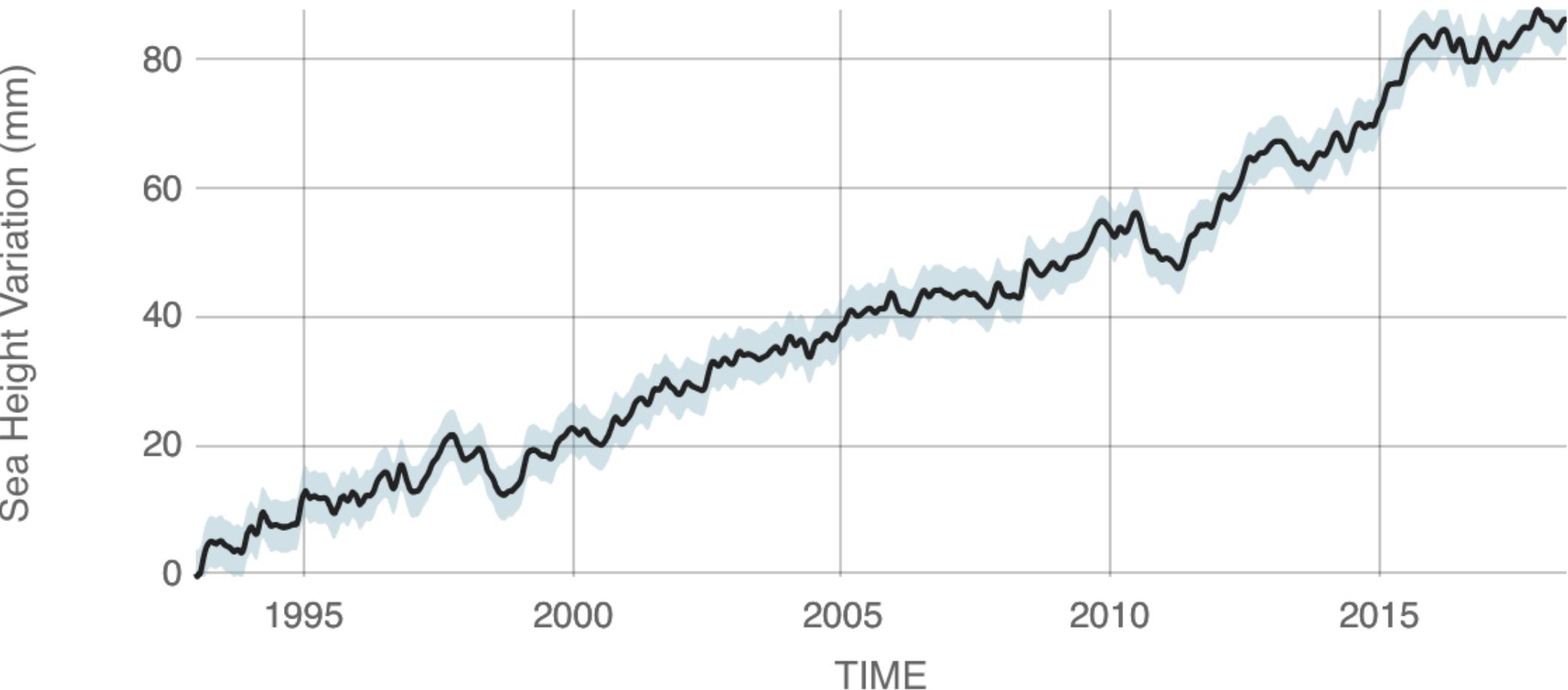
[4]



Ο ρυθμός θέρμανσης της **Αρκτικής ξεπερνάει** τον αντίστοιχο μέσο ρυθμό σε πλανητική κλίμακα (“Αρκτική μεγέθυνση” - Arctic amplification). Γιατί;

3.1 Παρατηρούμενες μεταβολές

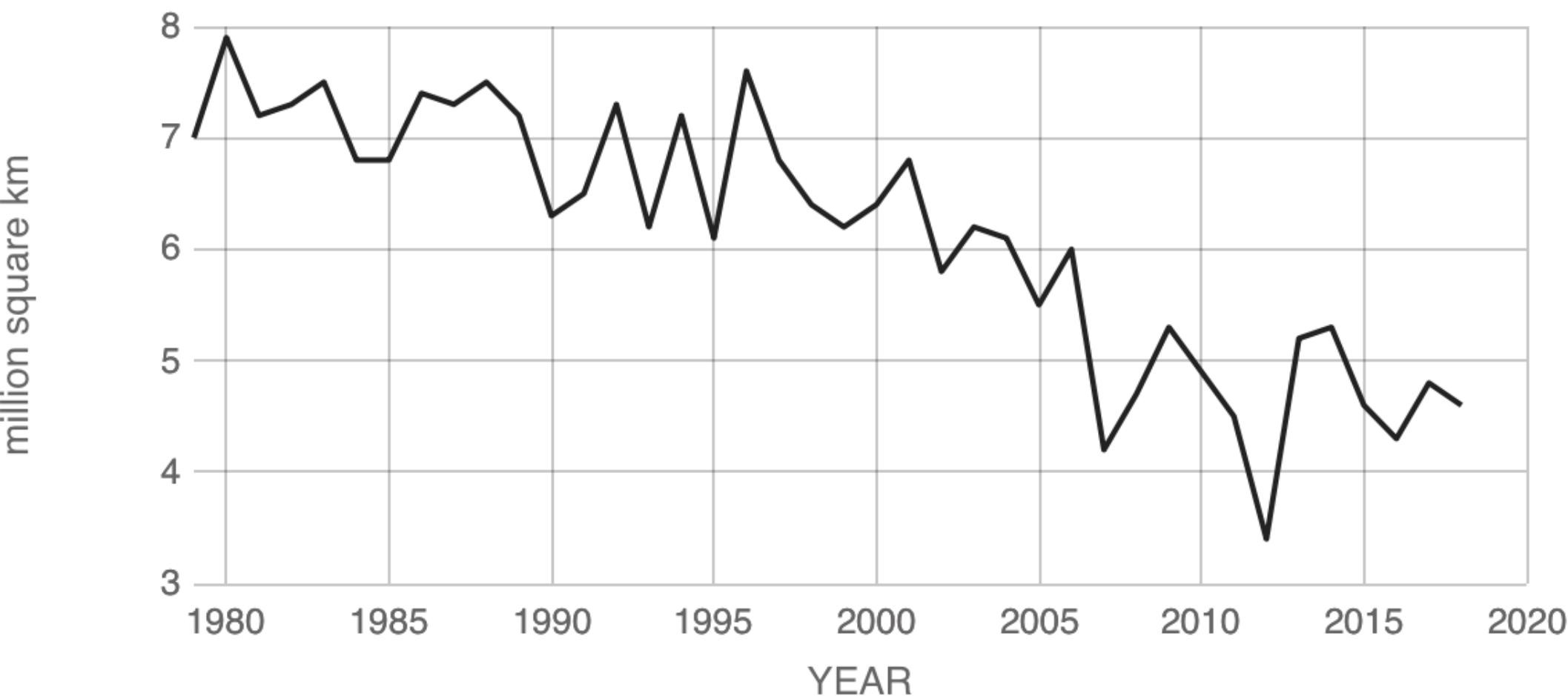
[5]



Μεταβολή της **στάθμης της θάλασσας**, σε πλανητική κλίμακα, από το **1993** μέχρι **σήμερα**. Ο **ρυθμός ανόδου** υπολογίζεται σήμερα σε **3.2 mm κατ' έτος**.

3.1 Παρατηρούμενες μεταβολές

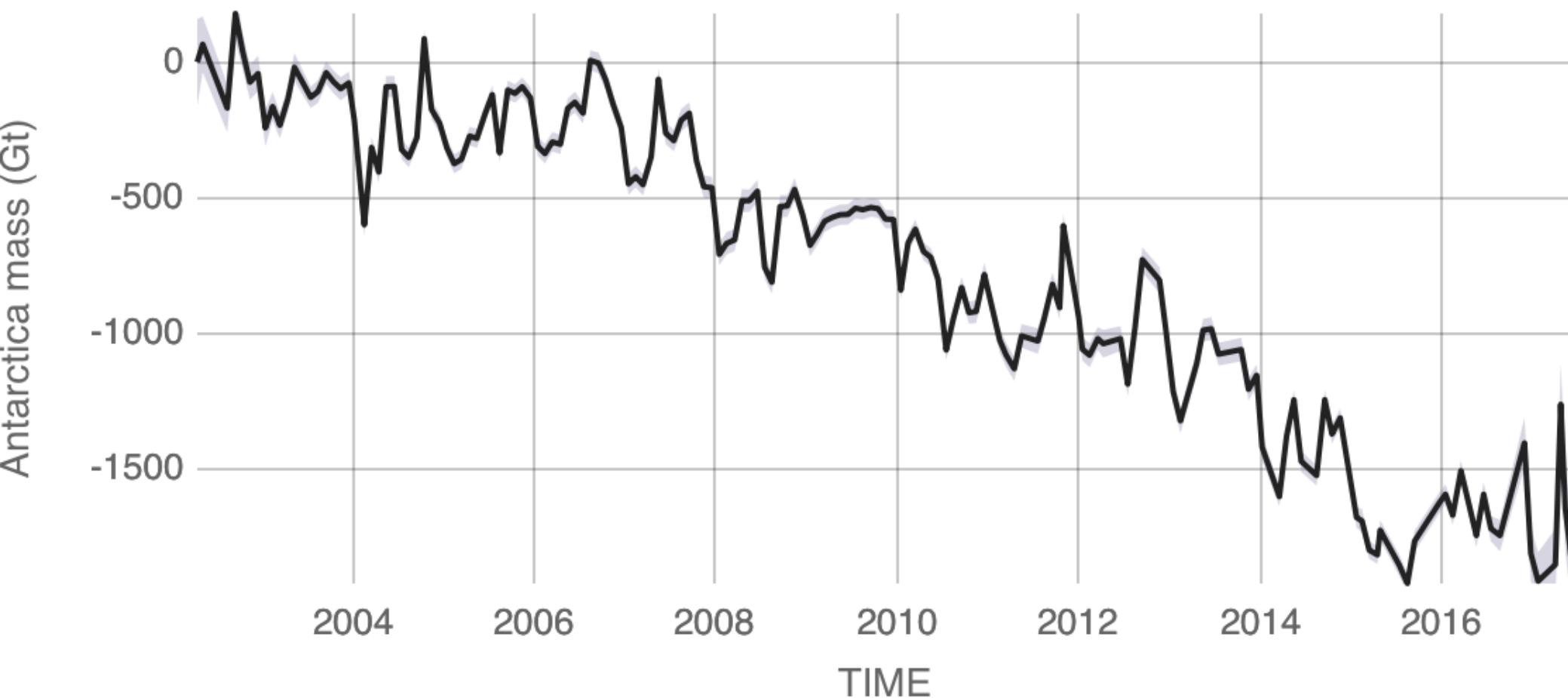
[6]



Μεταβολή της **επιφάνειας του θαλάσσιου πάγου** στην **Αρκτική**, από το **1980** μέχρι **σήμερα**. Ο **ρυθμός απώλειας** του Αρκτικού θαλάσσιου πάγου υπολογίζεται, σήμερα, σε **13.2% κατ' έτος**.

3.1 Παρατηρούμενες μεταβολές

[7]



Μεταβολή της **μάζας** των **παγετώνων** της **Ανταρκτικής** από το **2002** μέχρι **σήμερα**. Ο **ρυθμός απώλειας μάζας πάγου** στην Ανταρκτική υπολογίζεται, σήμερα, σε **127 Gton κατ' έτος**.

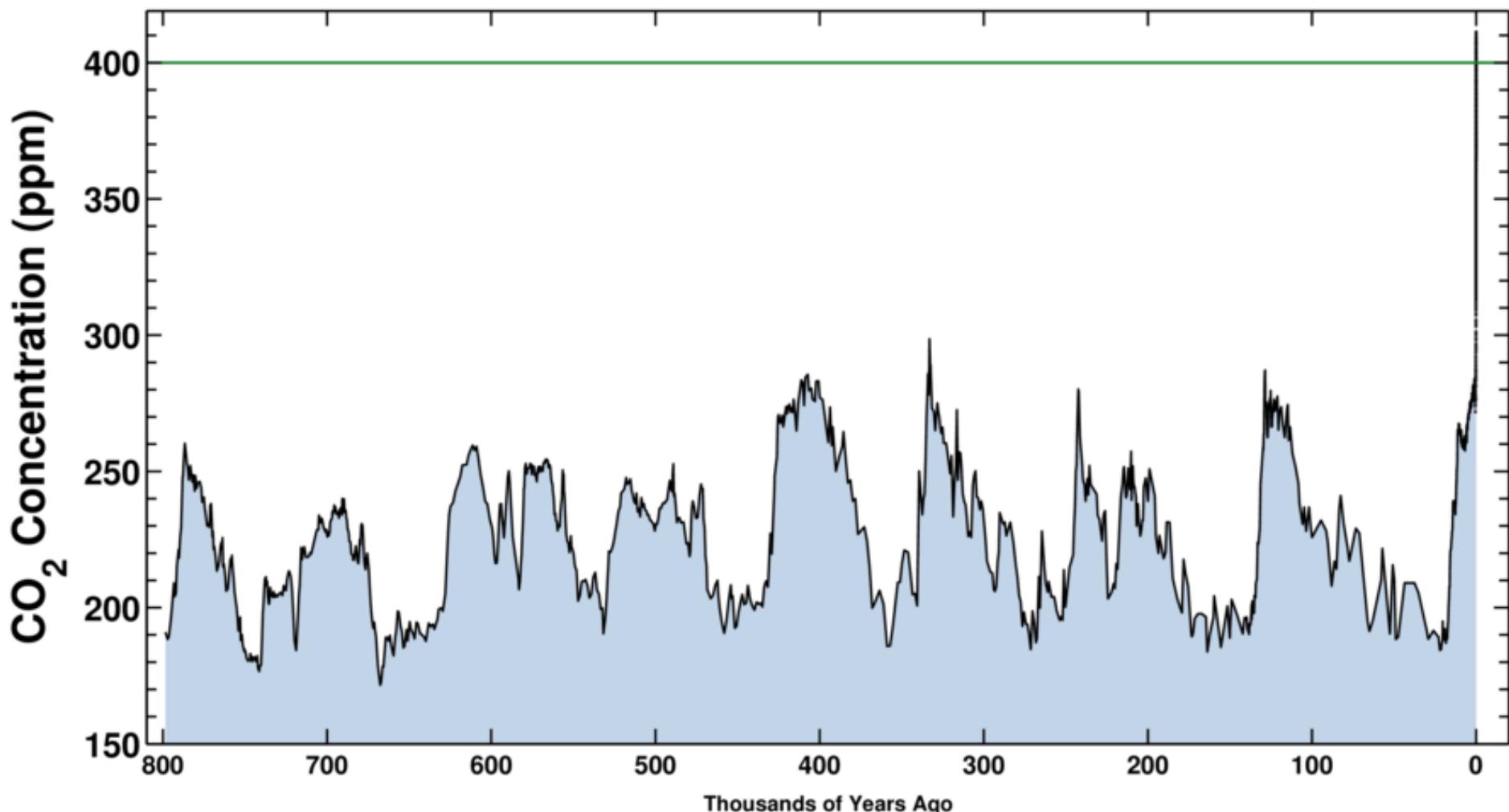
3.2 Η ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου

[1]

Latest CO₂ reading
October 08, 2018

405.47 ppm

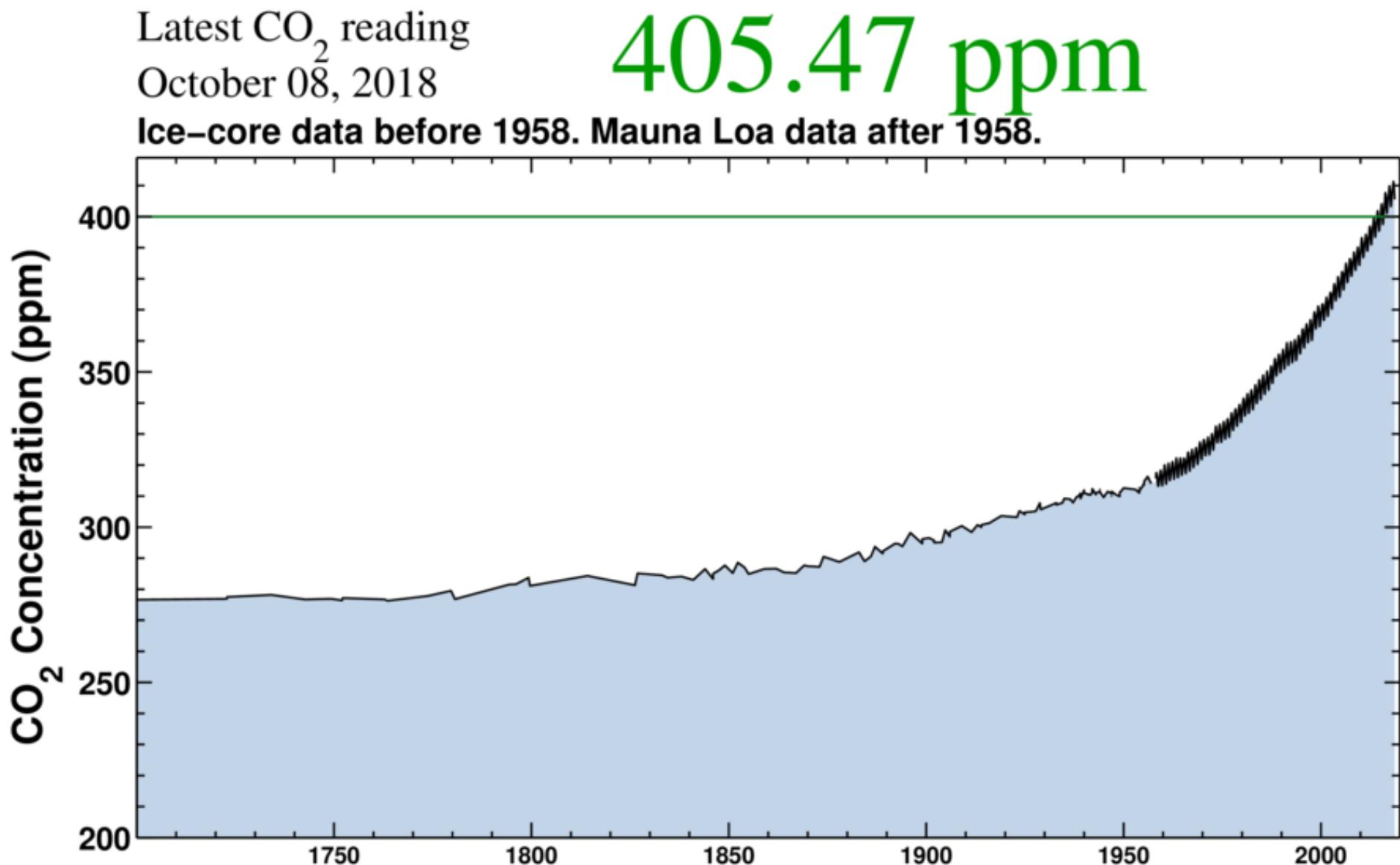
Ice-core data before 1958. Mauna Loa data after 1958.



Μεταβολή της συγκέντρωσης του CO₂ στην ατμόσφαιρα της Γης

3.2 Η ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου

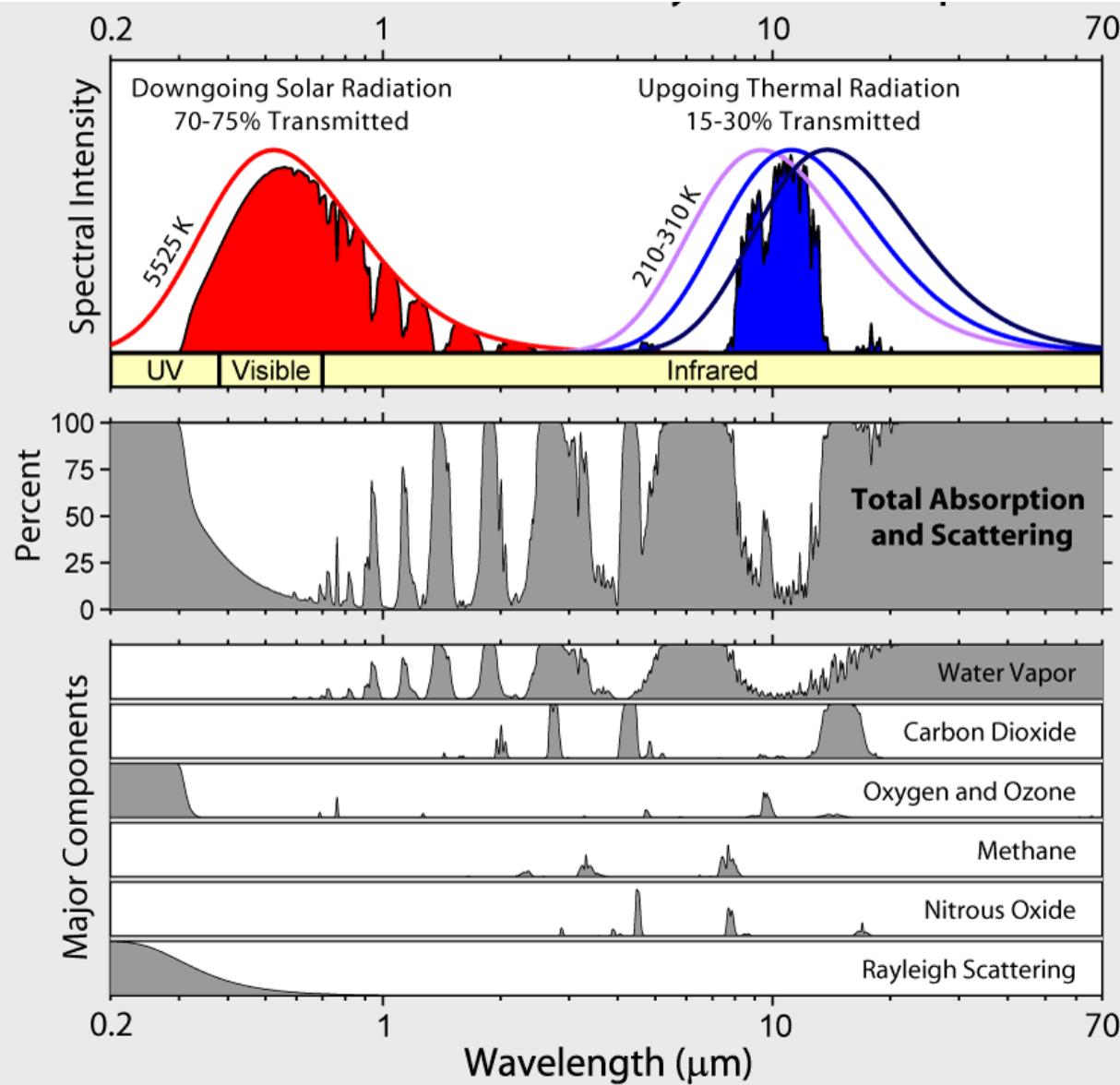
[2]



Μεταβολή της συγκέντρωσης του CO₂ στην ατμόσφαιρα της Γης

3.2 Η ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου

[3]



Η ατμόσφαιρα περιέχει ήδη **θερμοκηπικά αέρια**:

- H_2O
- CO_2
- CH_4
- N_2O

τα οποία, **απορροφώντας** το **90%** της εκπεμπόμενης **γήινης** ακτινοβολίας, επηρεάζουν το ενεργειακό ισοζύγιο, άρα και τη θερμοκρασία, της Γης.

Η **ανθρώπινη δραστηριότητα** χαρακτηρίζεται από **νέες πηγές παραγωγής** των παραπάνω αερίων, ώστε τελικά **ενισχύει** το “φυσικό” φαινόμενου του θερμοκηπίου.

3.2 Η ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου

[4]

Σύμφωνα με την τελευταία έκθεση της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματικής Αλλαγής (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC):

- η ατμοσφαιρική συγκέντρωση του **CO₂** παρουσιάζει αύξηση **40%**, από τα **278 ppm** το 1750 στα **390.5 ppm** το 2011 (~400 ppm σήμερα)
- η ατμοσφαιρική συγκέντρωση του **CH₄** παρουσιάζει αύξηση **150%**, από τα **0.722 ppm** το 1750 στα **1.803** το 2011
- οι σημερινές **συγκεντρώσεις** των **CO₂** και **CH₄** αποτελούν τις **υψηλότερες** που έχουν καταγραφεί τα τελευταία τουλάχιστον **800,000 έτη**

Η αύξηση της συγκέντρωσης του **CO₂** στην ατμόσφαιρα της Γης αποτελεί το **βασικό παράγοντα** για την παρατηρούμενη ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου:

- ο **μέσος ρυθμός αύξησης** του ατμοσφαιρικού CO₂, κατά τη διάρκεια της περιόδου **2002-2011**, υπολογίζεται σε **2.0 ± 0.1 ppm κατ' έτος**
- **45%** του ανθρωπογενώς εκπεμπόμενου CO₂ **παραμένουν** στην ατμόσφαιρα της Γης κάθε έτος, με το **55%** να **απομακρύνεται** στις καταβόθρες ξηράς και θάλασσας

Εισάγουμε στην ατμόσφαιρα περισσότερο CO₂ από όσο μπορεί το κλιματικό σύστημα να απομακρύνει!

3.3 Ο ρόλος των υδρατμών

[1]

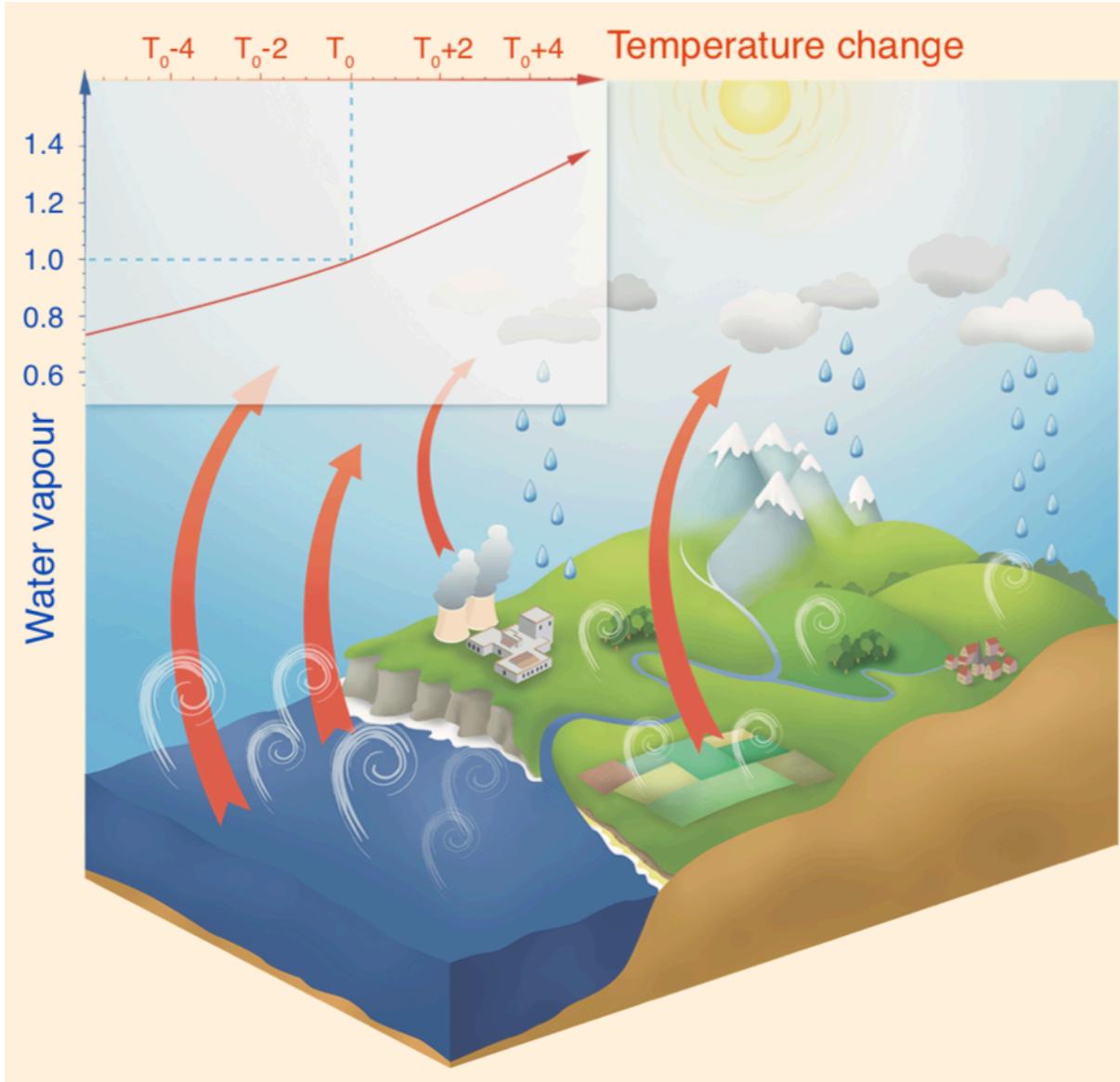
Οι **υδρατμοί** συνεισφέρουν στο **μεγαλύτερο ποσοστό** στο “φυσικό” φαινόμενο του θερμοκηπίου, με την ποσότητα τους στην ατμόσφαιρα της Γης να συναρτάται της **θερμοκρασίας**. Για το λόγο αυτό, οι υδρατμοί θεωρούνται περισσότερο ως **φορέας ανάδρασης** και λιγότερο ως **φορέας επιβολής**.

Σε σύγκριση με το **CO₂**, η συνεισφορά των **υδρατμών** στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι περίπου **2 - 3 φορές μεγαλύτερη**. Ωστόσο, οι **υδρατμοί** διαφέρουν από το CO₂ στη βάση του ότι μπορούν να **συμπυκνωθούν** και να **κατακρημνιστούν** από την ατμόσφαιρα (υετός). Έτσι, ο **μέσος χρόνος παραμονής** των υδρατμών στην ατμόσφαιρα της Γης είναι της τάξης των **10 ημερών**.

Η εκπομπή **ανθρωπογενών υδρατμών** (π.χ. άρδευση) έχει αποδειχθεί ότι έχει **αμελητέα συνεισφορά** στις παρατηρούμενες ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις, οι οποίες καθορίζονται κύρια από τις φυσικές πηγές.

3.3 Ο ρόλος των υδρατμών

[2]



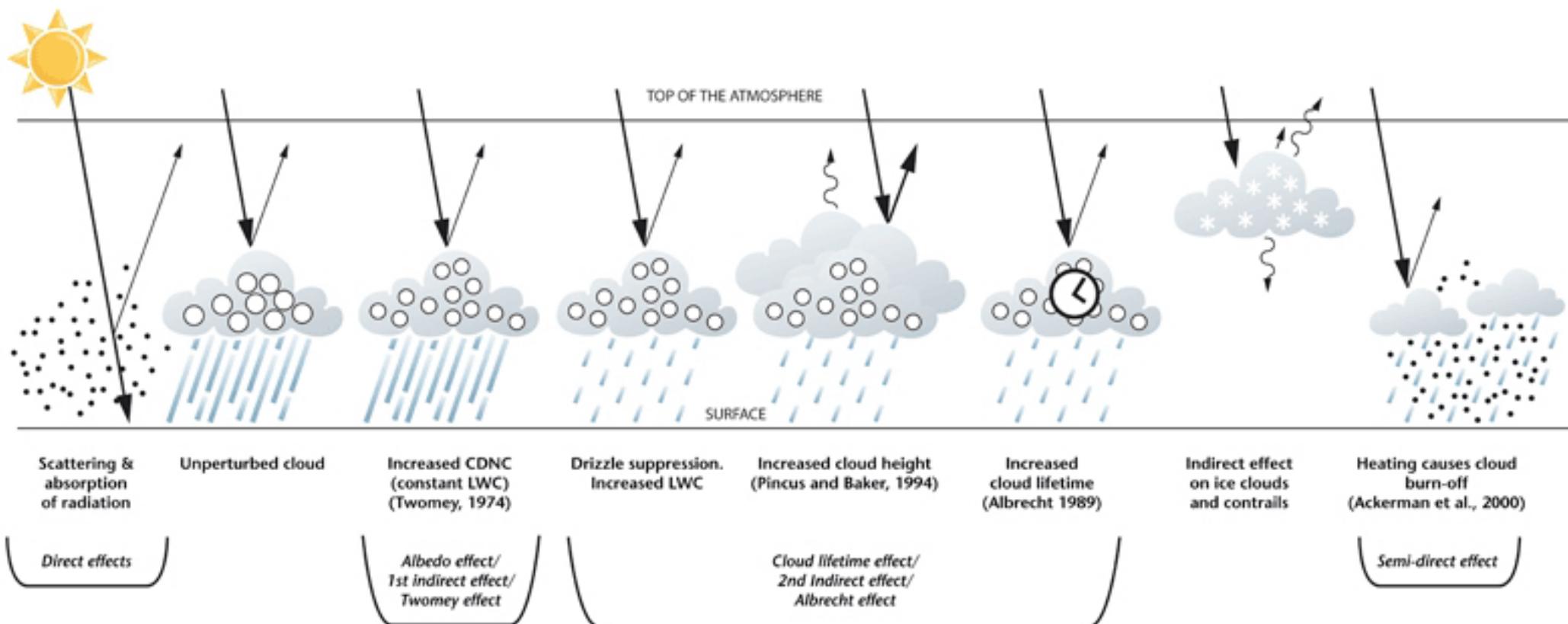
Η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση της ροής υδρατμών προς την ατμόσφαιρα μέσω της εξάτμισης, οδηγώντας τελικά σε μία θετική κλιματική ανάδραση (ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου).

Για κάθε 1°C αύξησης της θερμοκρασίας, η ατμοσφαιρική συγκέντρωση των υδρατμών αυξάνεται κατά $\sim 7\%$.

3.4 Ο ρόλος των αιωρούμενων σωματίδιων [1]

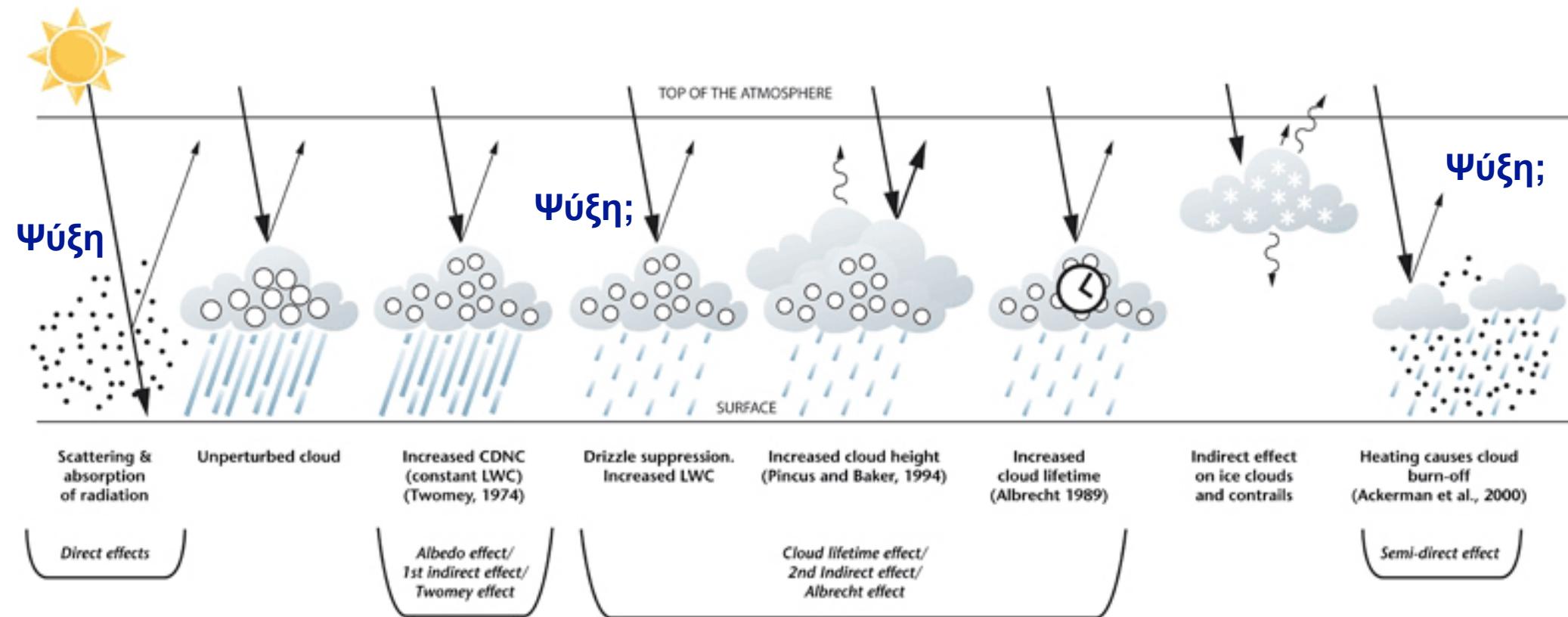
Τα **αιωρούμενα σωματίδια** ή αερολύματα αποτελούν ένα νέο **φορέα ενίσχυσης** του φαινομένου του θερμοκηπίου, άμεσα συνδεδεμένο με την **ανθρωπογενή δραστηριότητα**, εξαιρώντας την ερημική σκόνη.

Η συνεισφορά τους στην κλιματική αλλαγή αποτελεί ένα πολύπλοκο ερώτημα, καθώς επιδρούν με το ισοζύγιο ακτινοβολίας Γης-Ατμόσφαιρας με 3 διαφορετικούς τρόπους.



3.4 Ο ρόλος των αιωρούμενων σωματιδίων

[2]



Συνολικά, εκτιμάται ότι η επίδραση των **αιωρούμενων σωματιδίων** στο κλιματικό σύστημα είναι **αρνητική**, οδηγώντας σε ψύξη, της τάξης του **0.5 - 1.5 W m⁻²**.

3.5 Η έννοια του radiative forcing

Radiative forcing: Μέτρο που χρησιμοποιείται για την **ποσοτικοποίηση** της **επίδρασης** στο **ενεργειακό ισοζύγιο** του κλιματικού συστήματος, ως αποτέλεσμα της μεταβολής στις διεργασίες ή/και τα στοιχεία αυτού (π.χ. αύξηση της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου).

Εκφράζει την **μεταβολή της ολικής ακτινοβολίας (εισερχόμενη μείον εξερχόμενη)** στο **ανώτερο όριο της τροπόσφαιρας**, σε σύγκριση με τιμή αναφοράς για τη προβιομηχανική εποχή (προγενέστερα του 1750), και αναφέρεται σε **W m⁻²**.

Η βασική χρήση του RF είναι για τη **σύγκριση** της επίδρασης **φυσικών** και **ανθρωπογενών** παραγόντων στην κλιματική αλλαγή.

RF > 0

Η εισερχόμενη ακτινοβολία στο σύστημα Γη-Τροπόσφαιρα είναι μεγαλύτερη από την εξερχόμενη, οπότε έχουμε **θέρμανση** του συστήματος.

RF < 0

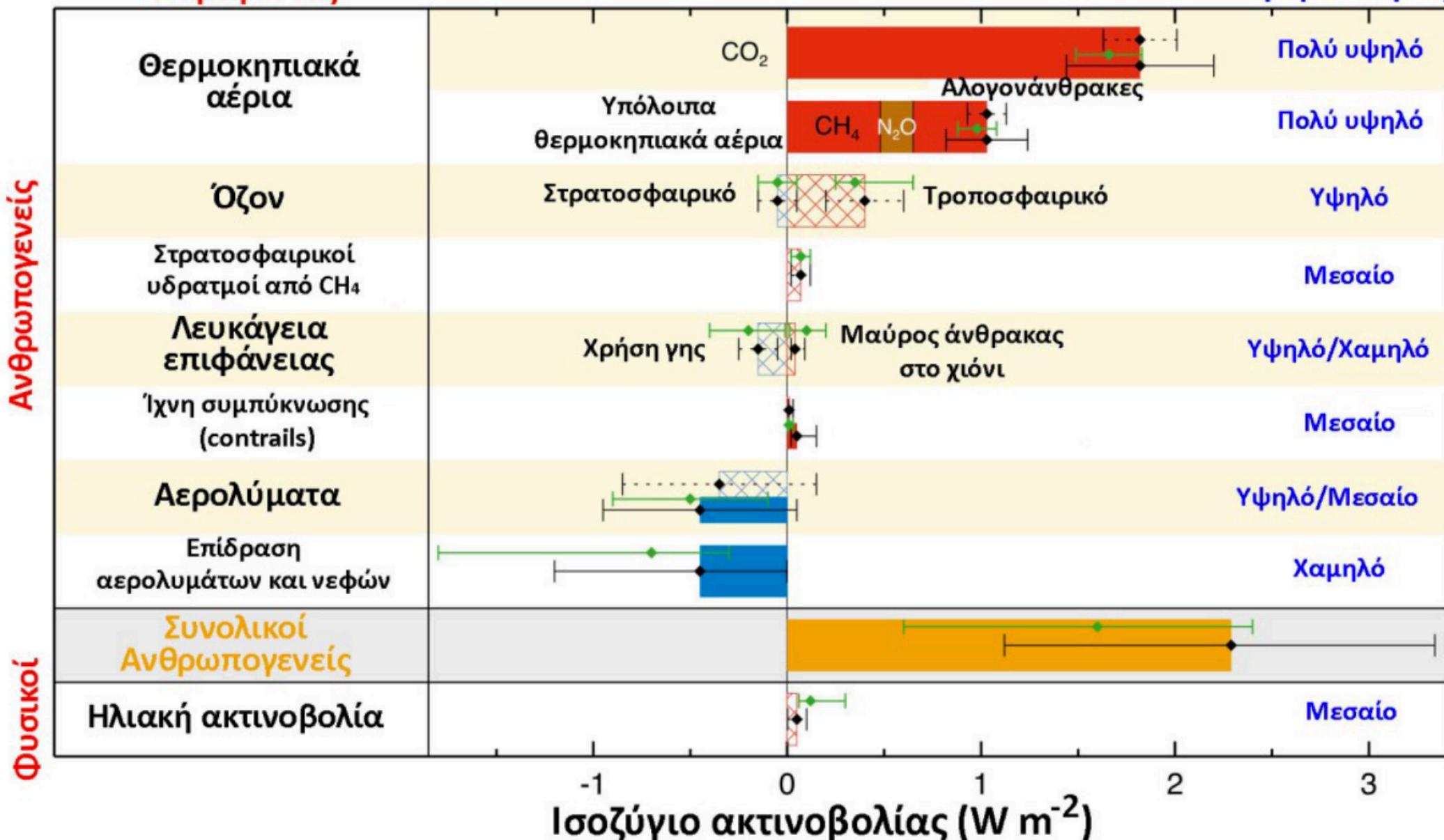
Η εισερχόμενη ακτινοβολία στο σύστημα Γη-Τροπόσφαιρα είναι μικρότερη από την εξερχόμενη, οπότε έχουμε **ψύξη** του συστήματος.

3.6 Η κλιματική αλλαγή σήμερα

Τροποποίηση του ισοζυγίου ακτινοβολιών από το 1750 έως το 2011

Παράγοντας

Επίπεδο βεβαιότητας



3.6 Κλιματικά μοντέλα

[1]

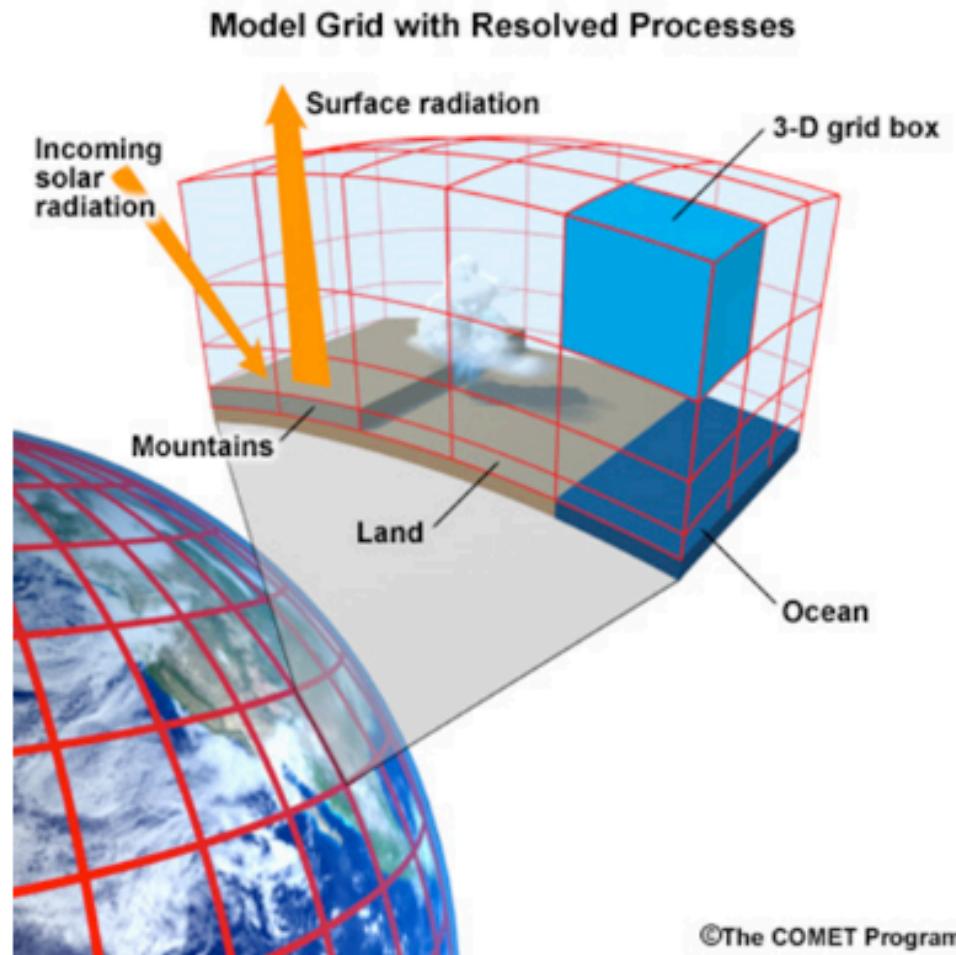
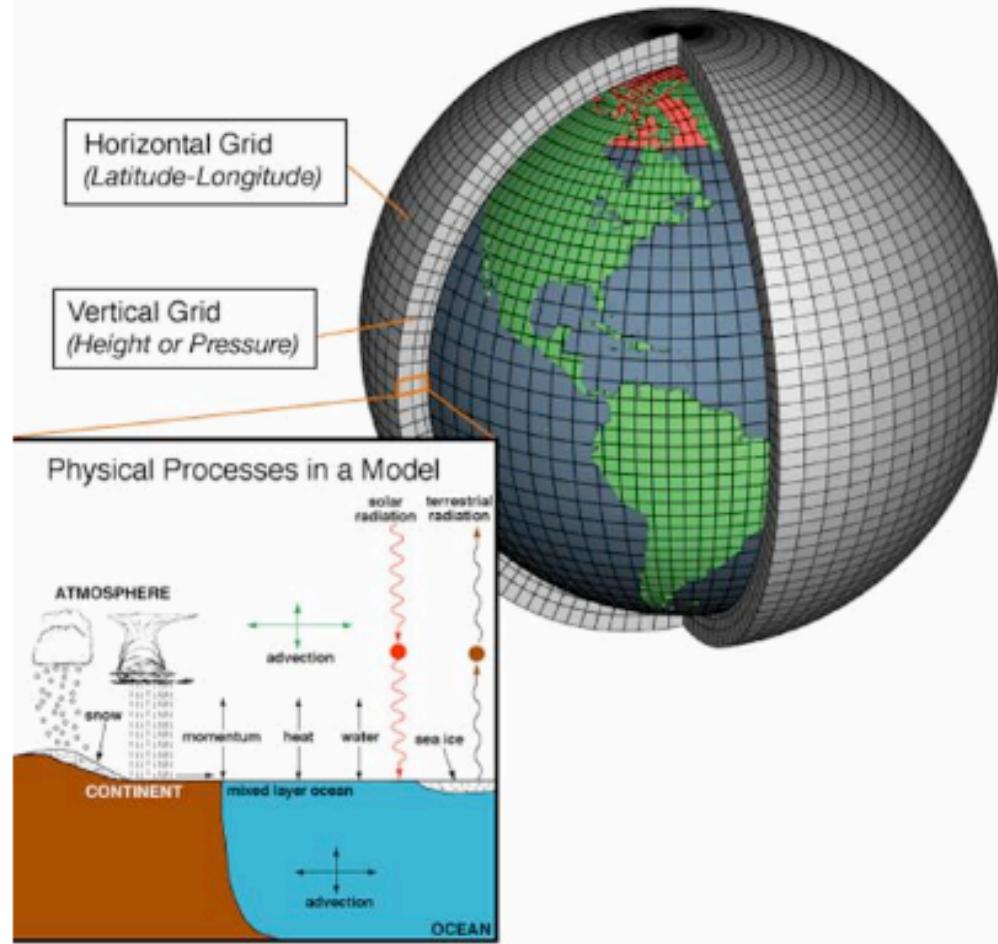
Κλιματικό μοντέλο: Υπολογιστικό (μαθηματικό) ομοίωμα του κλιματικού συστήματος.

Τα **κλιματικά μοντέλα** αποτελούν το **βασικό ερευνητικό εργαλείο** για την **μελέτη** και την **κατανόηση** της κλιματικής αλλαγής, τόσο στο **παρελθόν** όσο και, κυριότερα, στο **μέλλον**.

Εκμεταλλευόμενα τις δυνατότητες των σύγχρονων **υπερυπολογιστών**, αλλά και την πρόοδο στην **κατανόηση** και **μαθηματική/φυσική περιγραφή** των διεργασιών του κλιματικού συστήματος, τα σύγχρονα κλιματικά μοντέλα συμπεριλαμβάνουν στο μαθηματικό τους φορμαλισμό το σύνολο, σχεδόν, των συνιστωσών του κλιματικού συστήματος.

3.6 Κλιματικά μοντέλα

[2]



©The COMET Program

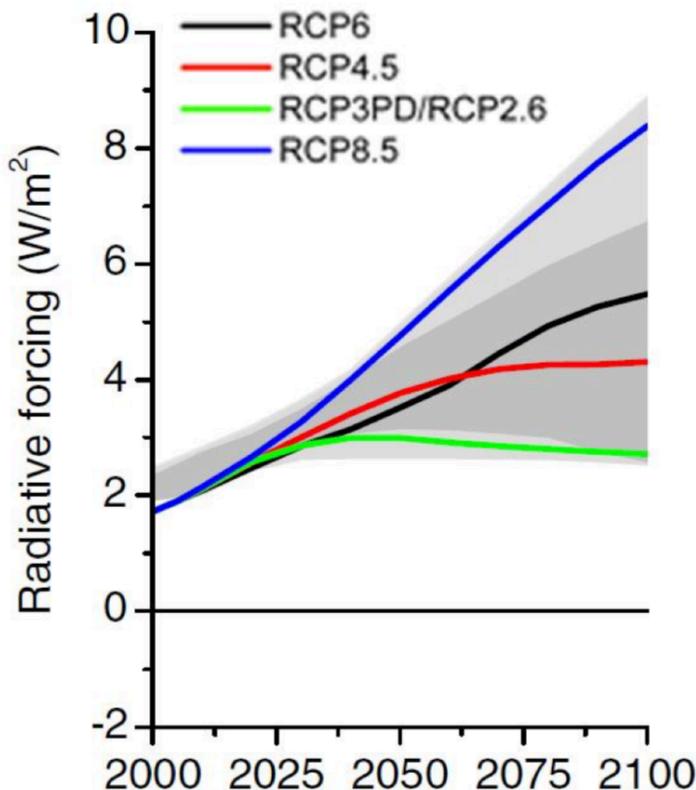
Σε ένα κλιματικό μοντέλο, η **ατμόσφαιρα** και η **επιφάνεια** της Γης αναπαρίσταται από **πεπερασμένο** αριθμό σημείων, σε κάθε ένα από τα οποία, επιλύονται οι **θεμελιώδεις εξισώσεις** που περιγράφουν την **κίνηση**, τη **χημεία** και το **ενεργειακό ισοζύγιο** του συστήματος.

3.6 Κλιματικά μοντέλα

[3]

Κλιματική προβολή: Εφαρμογή ενός κλιματικού μοντέλου για τη **μελλοντική προβολή** του κλίματος, με βάση συγκεκριμένες συνθήκες (**σενάρια**) για την **κοινωνικο-οικονομική** και **τεχνολογική εξέλιξη** του πλανήτη μας.

Τα αποτελέσματα των **κλιματικών προβολών** αντιπροσωπεύουν **πιθανά μελλοντικά κλίματα** της Γης, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην ποσοτικοποίηση του **πιθανού σύρους** των αλλαγών σε βασικές κλιματικές παραμέτρους (θερμοκρασία, υετός).



Κλιματικά σενάρια κατά IPCC

Ονομάζονται **Representative Climate Pathways (RCP)** και κάθε ένα από αυτά συνδέεται με ένα ορισμένο RF στο τέλος του τρέχοντος αιώνα (2100).

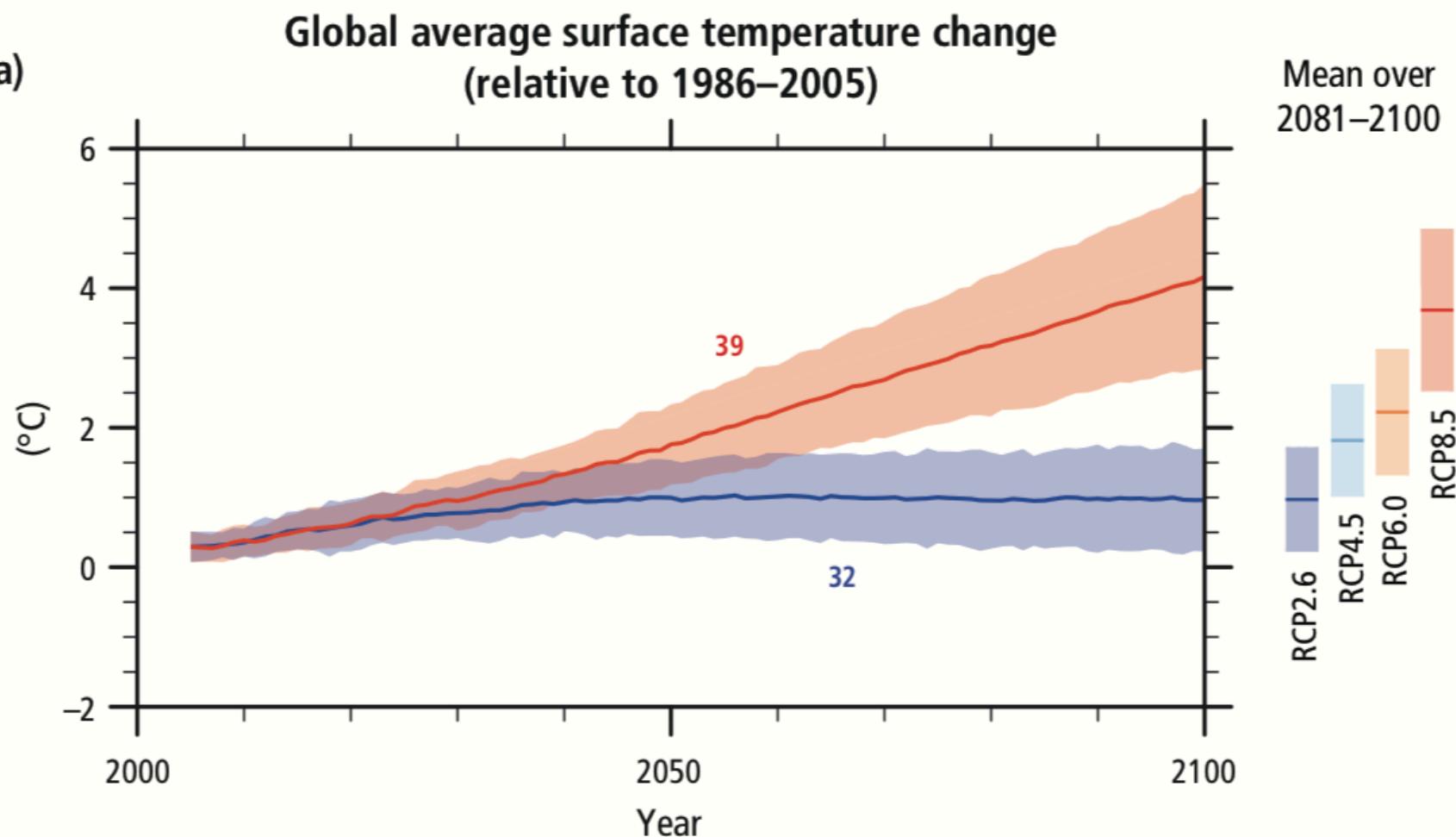
Name	Radiative forcing	CO ₂ equiv (p.p.m.)	Temp anomaly (°C)	Pathway	SRES temp anomaly equiv
RCP8.5	8.5 Wm ⁻² in 2100	1370	4.9	Rising	SRES A1F1
RCP6.0	6 Wm ⁻² post 2100	850	3.0	Stabilization without overshoot	SRES B2
RCP4.5	4.5 Wm ⁻² post 2100	650	2.4	Stabilization without overshoot	SRES B1
RCP2.6 (RCP3PD)	3 Wm ⁻² before 2100, declining to 2.6 Wm ⁻² by 2100	490	1.5	Peak and decline	None

Table 4: from Moss et.al. 2010. Median temperature anomaly over pre-industrial levels and SRES comparisons based on nearest temperature anomaly, from Rogelj et.al. 2012

3.7 Η κλιματική αλλαγή στο μέλλον

[1]

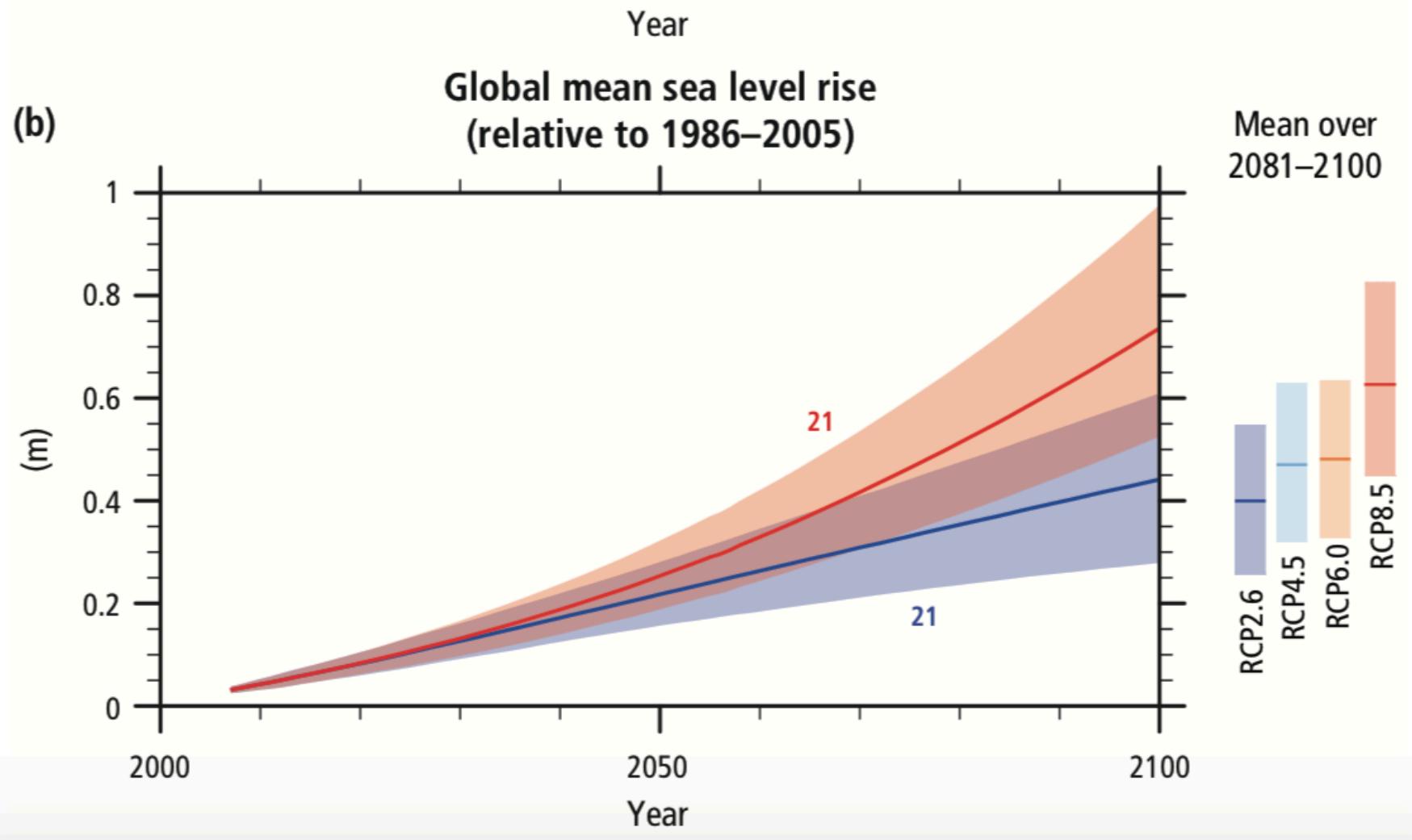
(a)



Είναι **σχεδόν βέβαιο** πως στο τέλος της περιόδου (2080-2100), οι περισσότερες περιοχές του πλανήτη μας θα αντιμετωπίζουν **πιο συχνά υψηλές θερμοκρασίες**, σε ημερήσια και εποχική κλίμακα.

3.7 Η κλιματική αλλαγή στο μέλλον

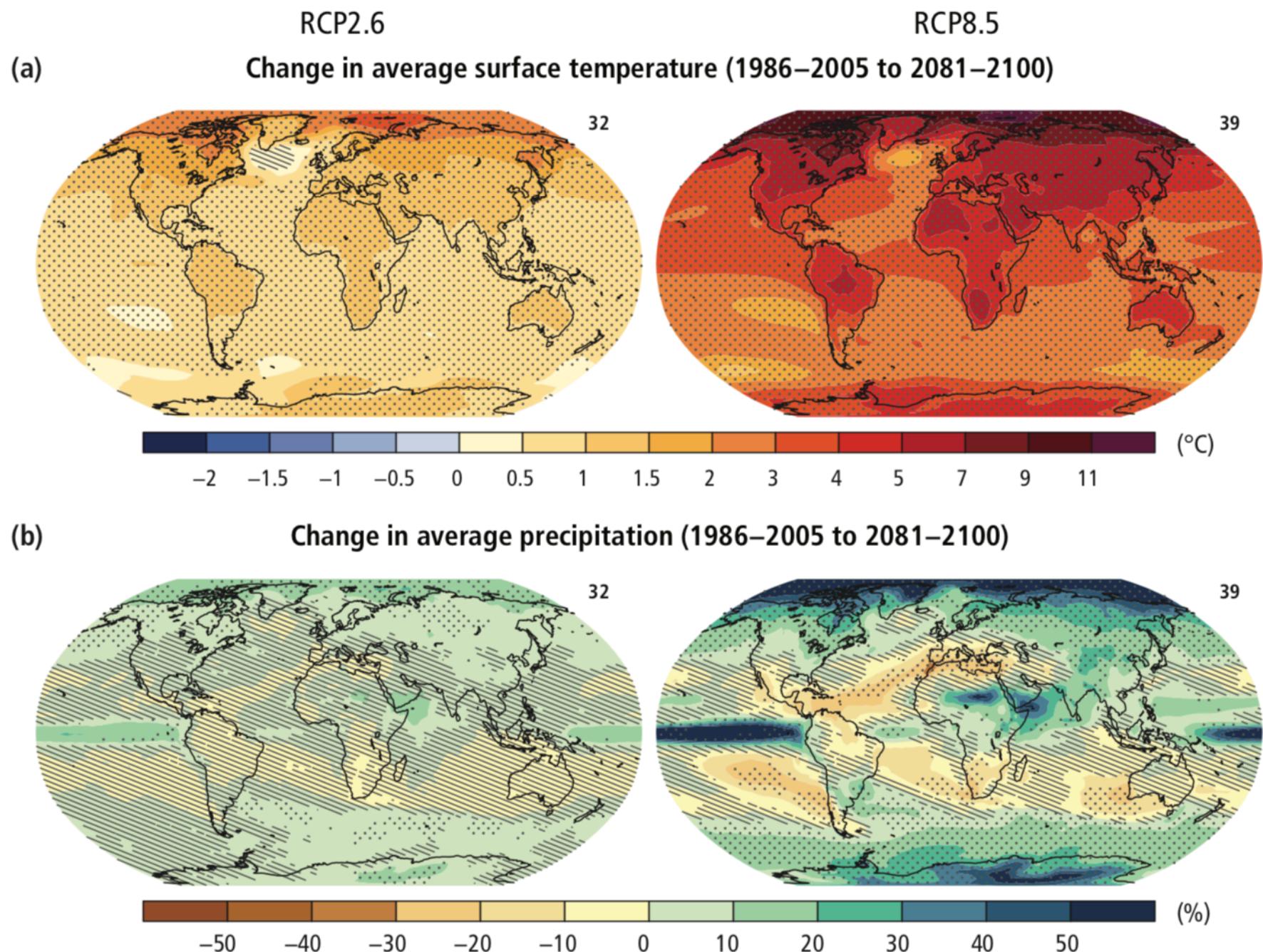
[2]



Στο τέλος της περιόδου (2080-2100), η **άνοδος της στάθμης της θάλασσας** αναμένεται μεταξύ **0.4-0.6 m.**

3.7 Η κλιματική αλλαγή στο μέλλον

[3]

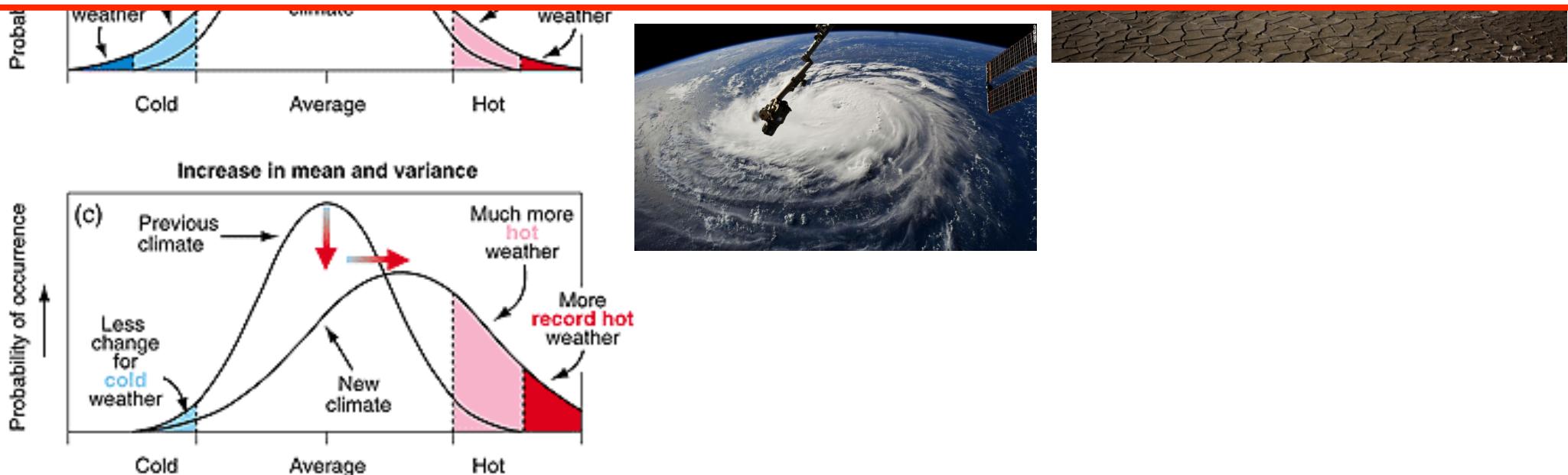


Σύνοψη



Report: we have just 12 years to limit devastating global warming

A UN panel of scientists says every bit of warming matters, and we're almost out of time to keep it in check.



Βιβλιογραφία

1. Εισαγωγή στη Φυσική της Ατμόσφαιρας και την Κλιματική Αλλαγή. Κατσαφάδος - Μαυροματίδης (<https://repository.kallipos.gr/handle/11419/3708>).
2. Climate Change 2013 - The Physical Science Basis. IPCC (<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>).
3. Climate Change 2014 - Synthesis Report. IPCC (<https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>).
4. Introduction to Climate Change: Lecture notes for meteorologists. Houghton, WMO (https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_926e.pdf).

... και μερικές ερωτήσεις

1. Πώς ορίζεται το κλίμα και ποιες οι κυριότερες παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή του;
2. Πώς περιγράφεται το φαινόμενο του θερμοκηπίου; Ποια είναι τα κυριότερα αέρια του θερμοκηπίου;
3. Τι ονομάζουμε κλιματική ανάδραση; Δώστε ένα παράδειγμα.
4. Ποιος είναι ο βασικός λόγος για την παρατηρούμενη υπερθέρμανση του πλανήτη;
5. Πώς ορίζεται το radiative forcing; Τι είναι τα κλιματικά σενάρια του IPCC; Δώστε δύο παραδείγματα κλιματικών σεναρίων.



Ευχαριστώ πολύ για την προσοχή σας

Ερωτήσεις:

Θοδωρής Μ. Γιάνναρος

Συνεργαζόμενος Ερευνητής

Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών

Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος & Βιώσιμης Ανάπτυξης

Email: thgian@noa.gr