



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΑΤΡΩΝ  
UNIVERSITY OF PATRAS

# ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά μαθήματα ΠΠ

ΤΙΤΛΟΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ: ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ - ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

ΕΝΟΤΗΤΑ: 3γ. Ενέργεια – Ακτινοβολία – Ενεργειακό ισοζύγιο  
του Πλανήτη

ΟΝΟΜΑ ΚΑΘΗΓΗΤΗ: ΑΓΓΕΛΙΚΗ ΦΩΤΙΑΔΗ

ΤΜΗΜΑ: Τμήμα Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων  
ΑΓΡΙΝΙΟ

# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Πατρών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «**Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση**» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



# ΑΓΓΕΛΙΚΗ ΦΩΤΙΑΔΗ

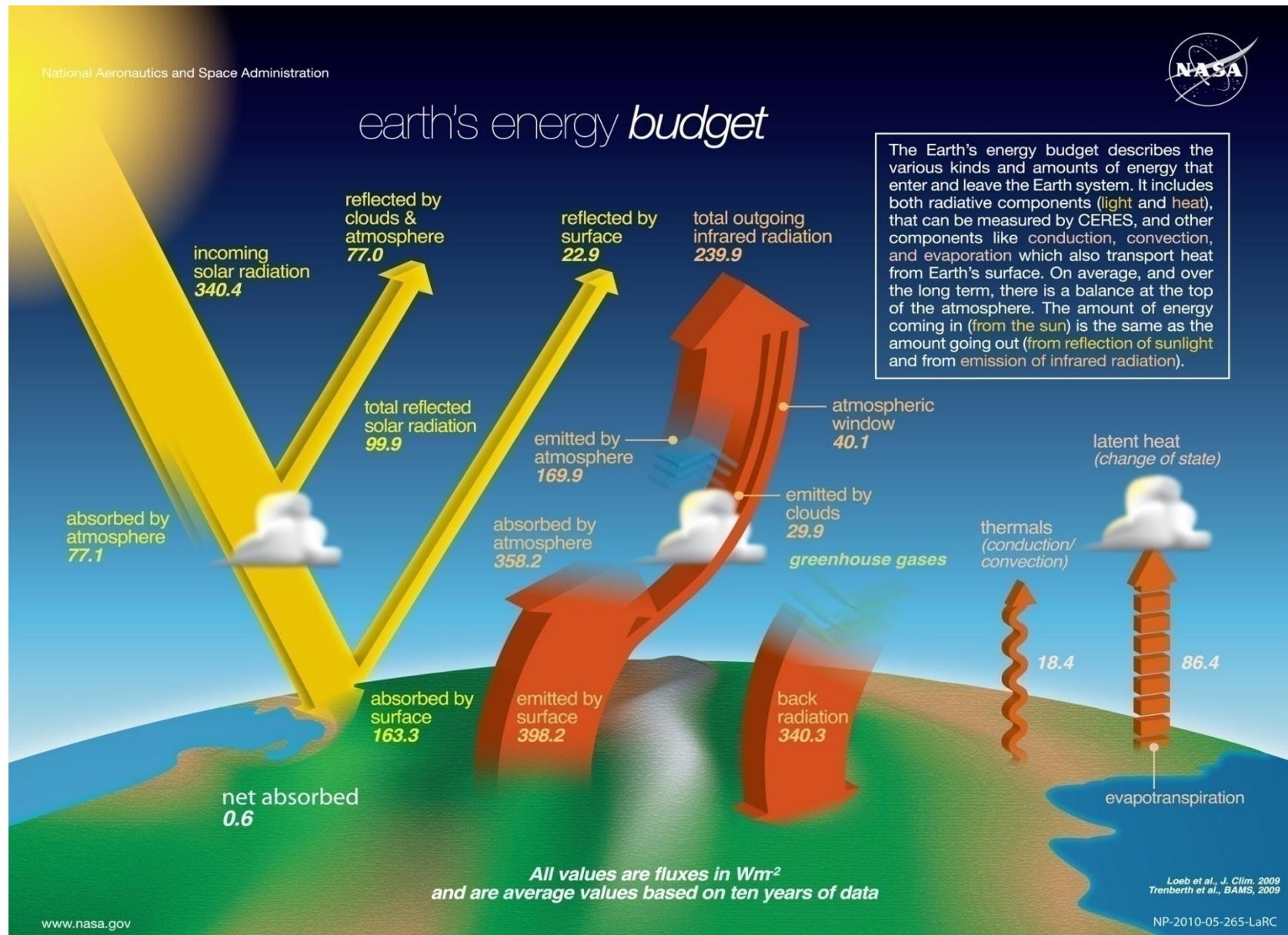
Επίκουρη Καθηγήτρια

του Τμήματος Διαχείρισης Περιβάλλοντος &  
Φυσικών Πόρων

 2641074156

 [afotiadi@upatras.gr](mailto:afotiadi@upatras.gr)

# Ενεργειακό Ισοζύγιο του Πλανήτη



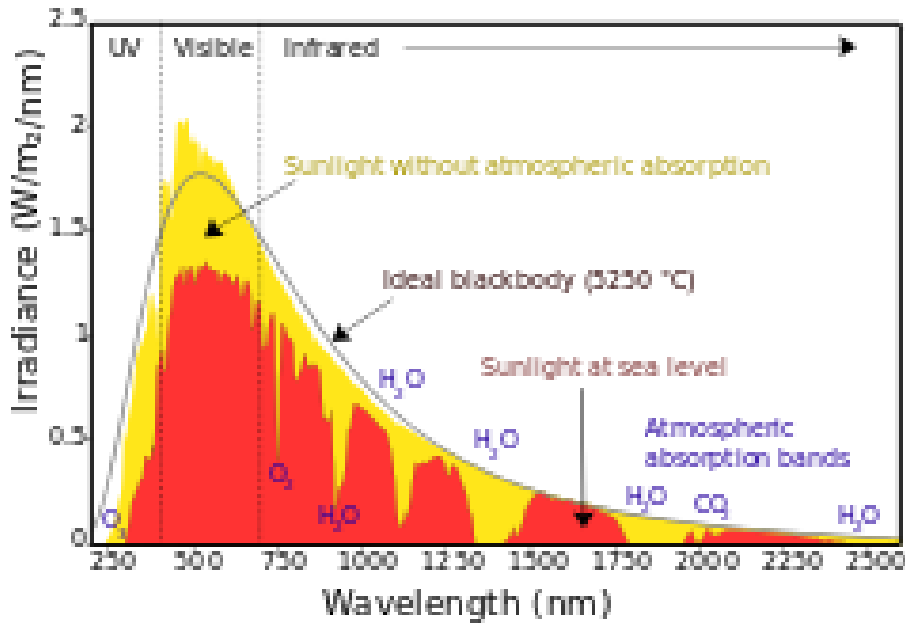
Πηγή: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bb/The-NASA-Earth's-Energy-Budget-Poster-Radiant-Energy-System-satellite-infrared-radiation-fluxes.jpg>

- Το ενεργειακό ισοζύγιο του πλανήτη είναι κυρίως αποτέλεσμα δύο συνιστωσών:
  - της ηλιακής ακτινοβολίας
  - της γήινης ακτινοβολίας

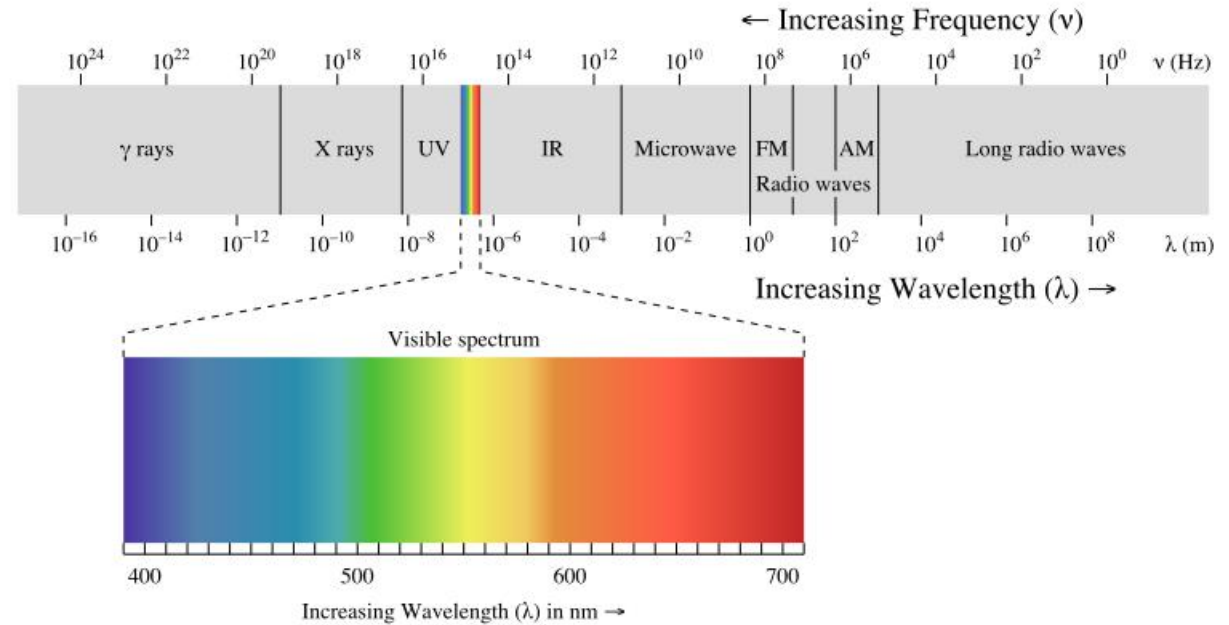


# Ηλιακή Ακτινοβολία

Spectrum of Solar Radiation (Earth)



Πηγή: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sunlight>



Πηγή: <https://en.wikipedia.org/wiki/Light>

## Φασματική Κατανομή της Ηλιακής ακτινοβολίας

Υπεριώδες (< 0.40 μm)	8.03 %
Ορατό (0.40 – 0.77 μm)	46.41 %
Υπέρυθρο (> 0.77 μm)	46.40 %

- Μας ενδιαφέρει η περιοχή του φάσματος:

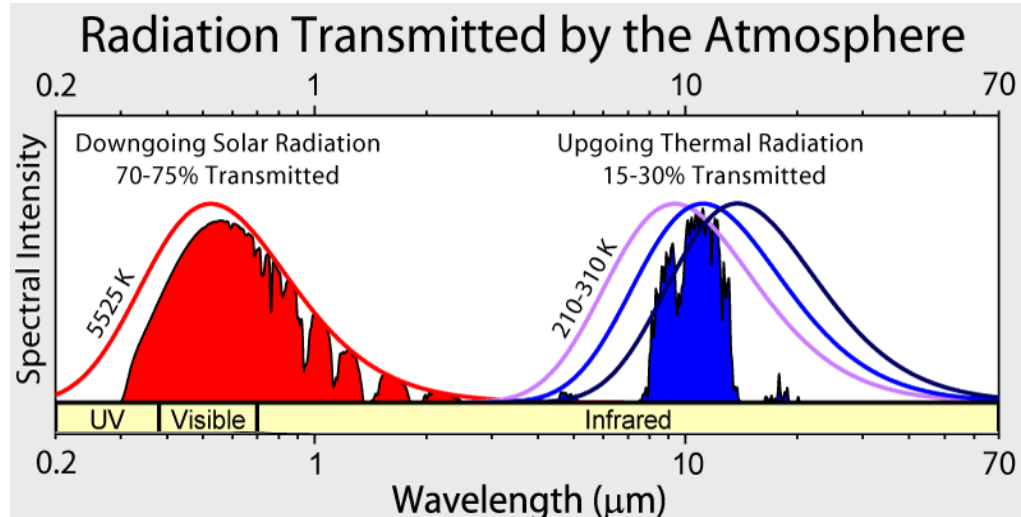
**0.29 – 14 μm**

(υπεριώδες – υπέρυθρο)

Γιατί μόνο αυτή η περιοχή φτάνει στην επιφάνεια της Γης



# Γήινη Ακτινοβολία & Ατμόσφαιρα



Πηγή: adapted from  
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7c/Atmospheric\\_Transmission.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7c/Atmospheric_Transmission.png)

- Θεωρούμε ότι και η Γη ακτινοβολεί ως “μέλαν σώμα” σε θερμοκρασία

$$T_{\text{Γης}} = \sim 288 \text{ }^\circ\text{K} \text{ ή } 15 \text{ }^\circ\text{C}$$

- Στην πραγματικότητα όμως η Γη ακτινοβολεί ως “φαιό σώμα” με ικανότητα εκπομπής των διαφόρων φυσικών επιφανειών από 0.85 έως 0.99 (μέση τιμή **0.95**)

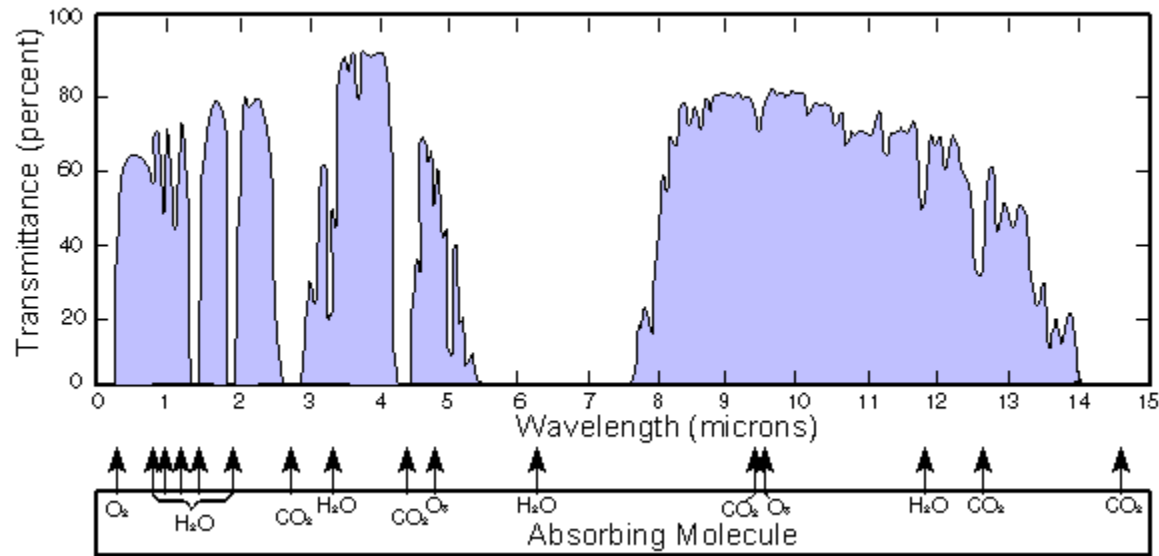
- Το φάσμα της γήινης ακτινοβολίας εκτείνεται από τα **4  $\mu\text{m}$**  μέχρι τα **100  $\mu\text{m}$**
- Το μέγιστο της γήινης ακτινοβολίας αντιστοιχεί στα **10  $\mu\text{m}$**  και ισούται με:

$$390 \text{ W/m}^2$$

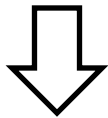
- Η γήινη ακτινοβολία καλείται **μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία** ή **Υπέρυθρη ακτινοβολία** ή **Γήινη ακτινοβολία**



# Γήινη Ακτινοβολία & Ατμόσφαιρα



Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared\\_window](https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared_window)



- Η Ατμόσφαιρα της Γης επίσης εκπέμπει ακτινοβολία ως “**φαιό σώμα**”
- Η ακτινοβολία που εκπέμπει η γήινη ατμόσφαιρα είναι μεγάλου μήκους κύματος (**Υπέρυθρη**) και καλείται **Θερμική Ακτινοβολία**

• Το σχήμα δείχνει το φάσμα εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας από την Τροπόσφαιρα με θερμοκρασία 280 K, ενώ οι διακεκομμένες γραμμές παριστάνουν την ακτινοβολία μέλανος σώματος για διάφορες θερμοκρασίες όπως και για τη θερμοκρασία των 280 K

• **Είναι εμφανές ότι η γήινη ατμόσφαιρα εκπέμπει υπέρυθρη ακτινοβολία**

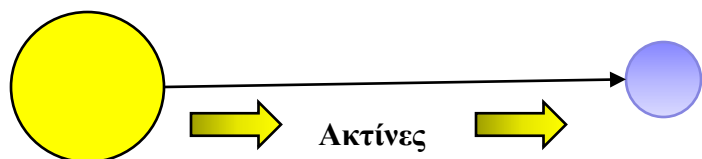




# Ηλιακή Ακτινοβολία – Ηλιακή Σταθερά

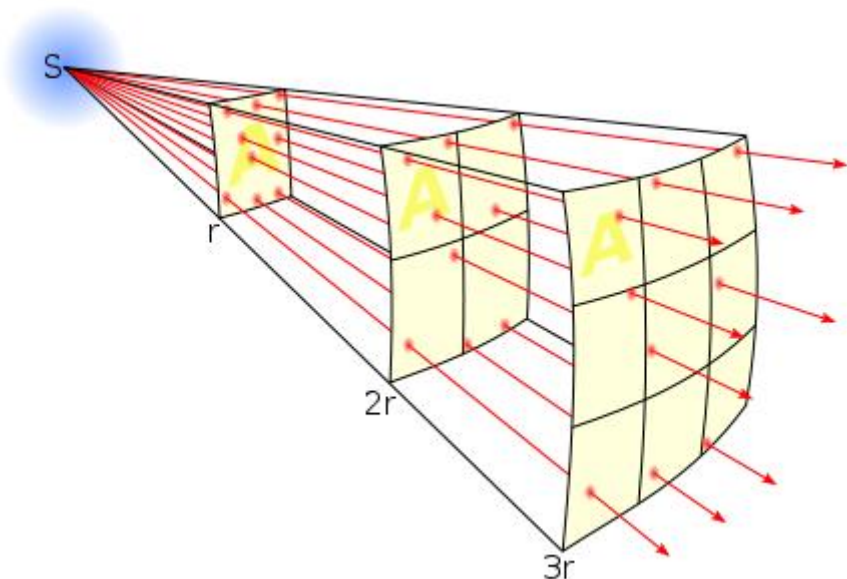
Ήλιος

Γη



Πηγή: with the courtesy of E. Kodouli

- Έστω ο Ήλιος εκπέμπει ενέργεια από ολόκληρη την επιφάνεια του με ρυθμό  $F \Rightarrow$  τότε η ενέργεια που εκπέμπει προς όλες τις διευθύνσεις θα ισούται με την ενέργεια που φτάνει στη μέση απόσταση Γης-Ηλίου
- Αν  $R_s$  η ακτίνα του Ήλιου και  $R_d$  η μέση απόσταση Γης – Ήλιου  $\Rightarrow$  τότε με βάση το νόμο των αντιστρόφων τετραγώνων



$$4\pi R_s^2 F = 4\pi R_d^2 S_o \Rightarrow S_o = 1370 \text{ Wm}^{-2}$$



**Ηλιακή σταθερά**

Πηγή: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/28/Inverse\\_square\\_law.svg/2000px-Inverse\\_square\\_law.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/28/Inverse_square_law.svg/2000px-Inverse_square_law.svg.png)



# Ηλιακή Ακτινοβολία – Ηλιακή Σταθερά

- Η Γη έχει πολύ μικρή ενεργό επιφάνεια απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας, ίση με αυτή ενός δίσκου, παρά με εκείνη μιας τρισδιάστατης σφαίρας. Έτσι

Πηγή:

<http://physics.stackexchange.com/questions/185452/black-body-golf-balls>

- Η Γη αποκόπτει ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας καθώς αυτή διαδίδεται στο διάστημα λόγω του ότι παρεμβάλλεται στην πορεία της σαν ένας δίσκος εμβαδού  $\pi R^2$ , R η ακτίνα της

- Η επιφάνεια της Γης που δέχεται ακτινοβολία από τον Ήλιο είναι  $4\pi R^2$

$$\frac{\pi R^2}{4\pi R^2} S_o = \frac{1}{4} S_o \approx 343 Wm^{-2}$$



Το κλάσμα της ηλιακής ενέργειας που λαμβάνεται ανά μονάδα επιφάνειας από το σύστημα Γη-Ατμόσφαιρα στην κορυφή της ατμόσφαιρας



# Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

- Μέρος της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στην κορυφή της ατμόσφαιρας ανακλάται πίσω στο διάστημα

$R_p$  = ανακλαστικότητα του πλανήτη ή λευκαύγεια ή **albedo** = ποσοστό ακτινοβολία που ανακλάται σε σχέση με την προσπίπτουσα

- $R_p$  εξαρτάται από: νέφη, σκέδαση από αέρια μόρια & αερολύματα και την ανακλαστικότητα της επιφάνειας του πλανήτη ( $R_s$ )

$$R_p = \frac{F}{F_{out}} \approx 0.3$$



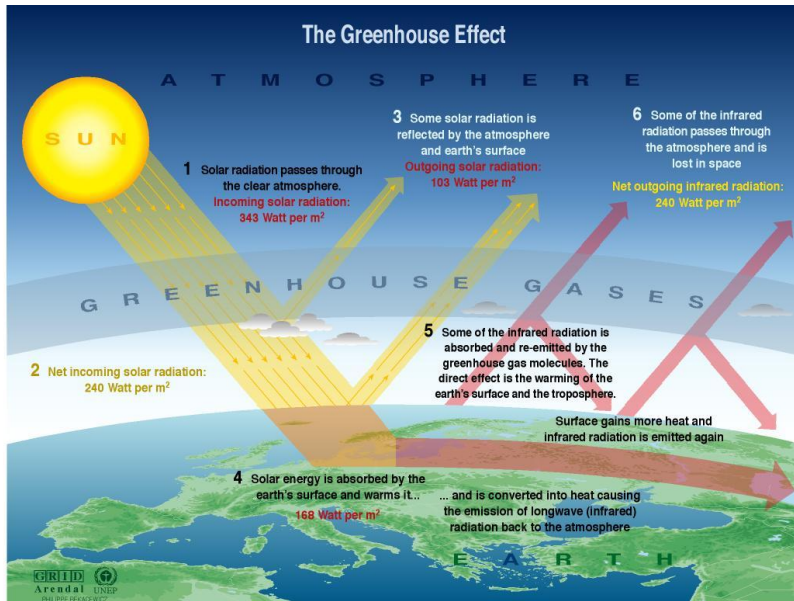
Η ακτινοβολία που εισέρχεται ή απορροφάται από το σύστημα Ατμόσφαιρα-Γη  $\approx 240 \text{ Wm}^{-2}$

- Η εισερχόμενη ηλιακή ενέργεια στην επιφάνεια της Γης είναι:  $F_s = \frac{S_o}{4} (1 - R_p)$
- Η Γη ακτινοβολεί σαν μέλαν σώμα θερμοκρασίας  $T_e$  (ενεργός θερμοκρασία). Η ενέργεια που εκπέμπεται από το σύνολο του πλανήτη δίνεται από τον νόμο των Stefan-Boltzman

$$F_L = \sigma T_e^4$$



# Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου



Sources: Okanagan university college in Canada, Department of geography, University of Oxford, school of geography, United States Environmental Protection Agency (EPA), Washington: Climate change 1995, The science of climate change, contribution of working group 1 to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change, UNEP and WMO, Cambridge university press, 1996.

Πηγή: <http://www.grida.no/publications/vg/africa/page/3110.aspx>

- Το σύστημα Γη-Ατμόσφαιρα πρέπει να βρίσκεται σε θερμική ισορροπία δηλ. όση ενέργεια δέχεται τόση και να αποβάλει =>εισερχόμενη ηλιακή ενέργεια στην επιφάνεια της Γης είναι:

$$F_L = F_s \Rightarrow T_e = \left( \frac{(1 - R_p) S_o}{4\sigma} \right)^{1/4} \Rightarrow \begin{matrix} T_e = 255 \text{ K} \\ \text{ή} \\ T_e = -18 \text{ }^\circ\text{C} ! \end{matrix}$$

$R_p = 0.3$

- Αν υποθέσουμε ότι η ατμόσφαιρα της Γης δεν έχει καθόλου νέφη =>  $R_p = 0.15 \Rightarrow T_e = 268 \text{ K}$  ή  $T_e = -5 \text{ }^\circ\text{C}$

• Όμως η πραγματική θερμοκρασία της Γης είναι:  **$T = +15 \text{ }^\circ\text{C}$**

• Η οποία οφείλεται στην **παρουσία της ατμόσφαιρας** και στο **Φαινόμενο του Θερμοκηπίου** που έχει σαν αποτέλεσμα η παρουσία της

$$F_L = \sigma T_e^4$$

Όπου:

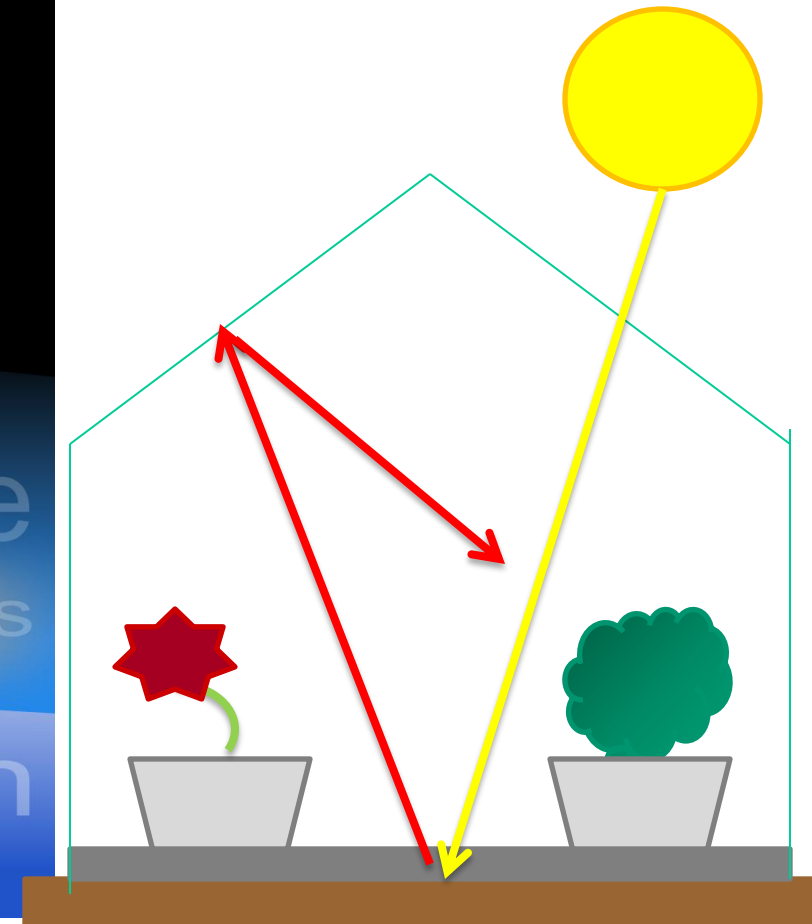
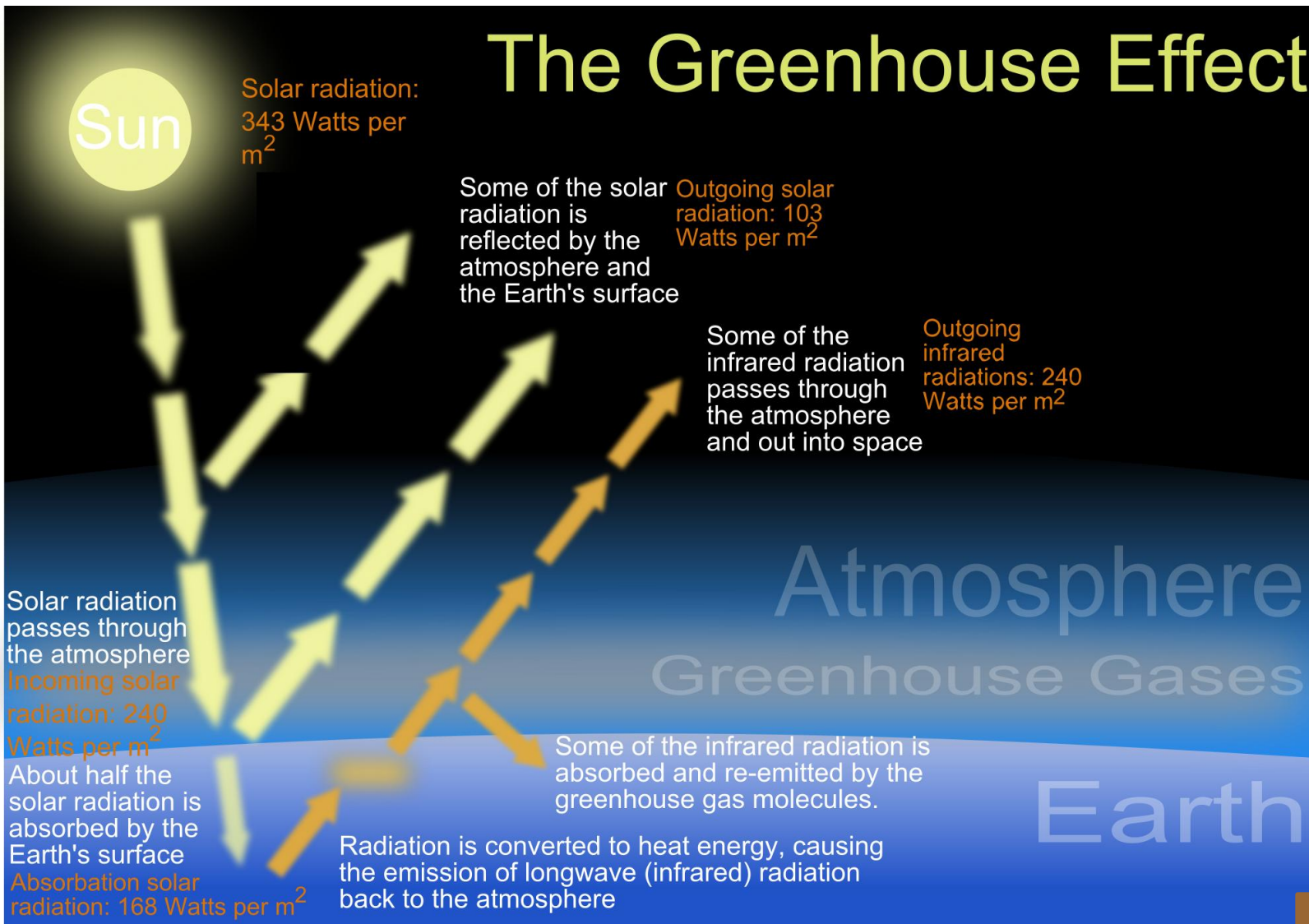
$F_L$  = η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τη Γη ( $\text{Wm}^{-2}$ )

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$  η σταθερά των Stefan-Boltzman

$T_e$  = η ενεργός θερμοκρασία της σε  $^\circ\text{K}$



# Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου



Πηγή: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d5/The\\_green\\_house\\_effect.svg/2000px-The\\_green\\_house\\_effect.svg.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d5/The_green_house_effect.svg/2000px-The_green_house_effect.svg.png)

Πηγή: with the courtesy of E. Kodouli

- Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου είναι ένα **φυσικό φαινόμενο** !



# Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

## ο Μοντέλο του ενός ατμοσφαιρικού στρώματος

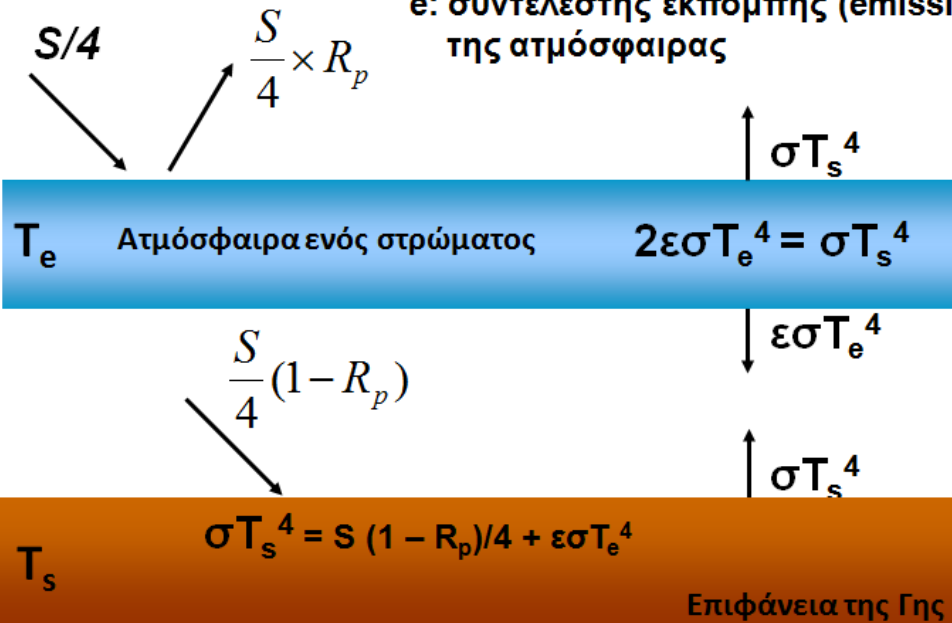
### • Υποθέσεις:

1/ Η ατμόσφαιρα αποτελεί ένα στρώμα

2/ Η Γη εκπέμπει ακτινοβολία ως μέλαν σώμα (δηλ.  $\epsilon_s = 1$ )

3/ Η ατμόσφαιρα συμπεριφέρεται ως 'γκρι' σώμα  $\Rightarrow$  ο συντελεστής εκπομπής  $\epsilon < 1$

$\epsilon$ : συντελεστής εκπομπής (emissivity) της ατμόσφαιρας



• Θεωρώντας το ενεργειακό ισοζύγιο ακτινοβολίας (αρχή διατήρηση της ενέργειας)

ο Κορυφή της ατμόσφαιρας: 
$$\frac{S}{4} = R_p \frac{S}{4} + \epsilon\sigma T_e^4 + (1 - \epsilon)\sigma T_s^4 \Rightarrow$$

$$\frac{S}{4} (1 - R_p) = \epsilon\sigma T_e^4 + (1 - \epsilon)\sigma T_s^4 \quad (1)$$

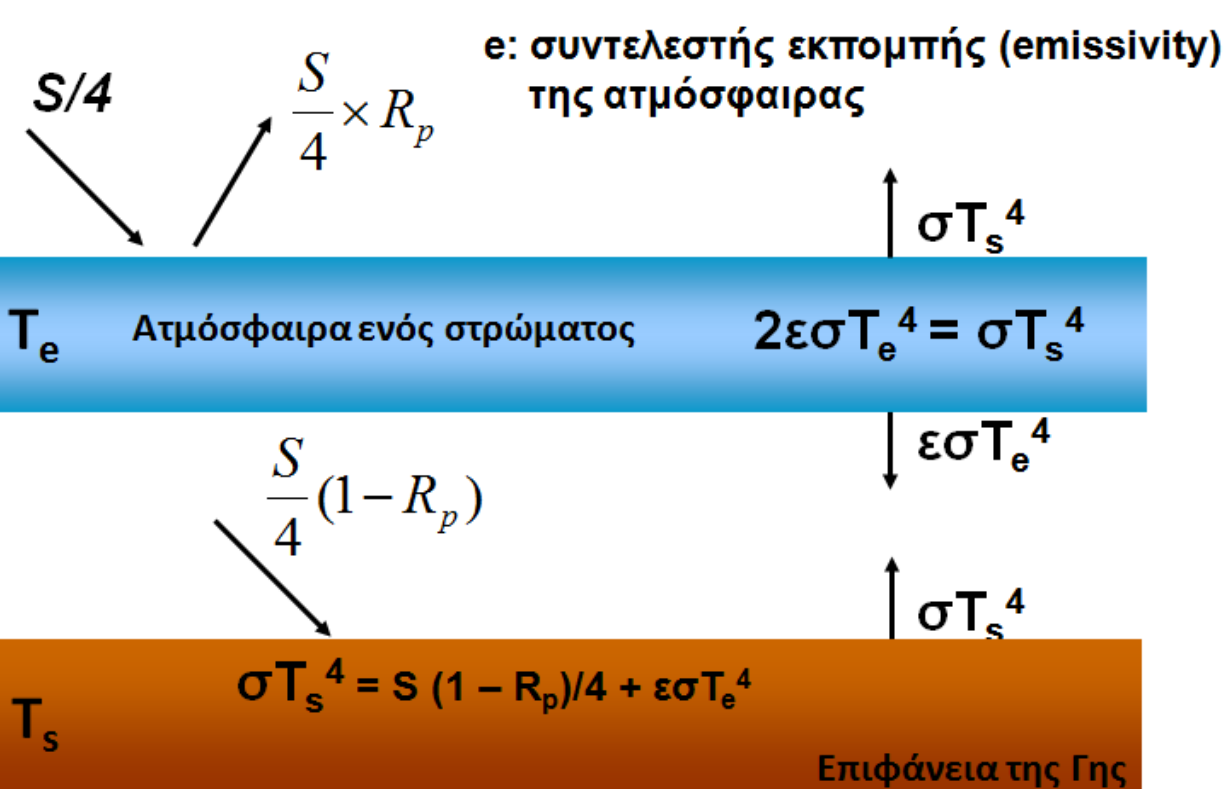
ο Στην ατμόσφαιρας: 
$$\sigma\epsilon T_s^4 = 2\epsilon\sigma T_e^4 \quad (2)$$

ο Στην επιφάνεια της Γης: 
$$\frac{S}{4} (1 - R_p) + \epsilon\sigma T_e^4 = \sigma\epsilon T_s^4 \quad (3)$$



# Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

## ο Μοντέλο του ενός ατμοσφαιρικού στρώματος



$$T_s^4 = \frac{(1 - R_p)S}{[4\sigma(1 - \epsilon/2)]} \quad (4)$$

$$2T_e^4 = T_s^4 \quad (5)$$

$$T_s = \left\{ \frac{(1 - R_p)S}{[4\sigma(1 - \epsilon/2)]} \right\}^{1/4} \quad (6)$$

$$T_e = T_s / 2^{1/4} \quad (7)$$

ο Θεωρώντας ότι  $R_p = 0.3$  και  $S = 1378 \text{ Wm}^{-2}$ :

ο  $\epsilon = 0 \Rightarrow$  μη εμφάνιση του φαινομένου του θερμοκηπίου  $\Rightarrow T_s = 255 \text{ K} = -18^\circ\text{C}$

ο  $\epsilon = 1 \Rightarrow$  εμφάνιση 'τέλειου' φαινομένου του θερμοκηπίου  $\Rightarrow T_s = 303 \text{ K} = +30^\circ\text{C}$  πολύ θερμά !

ο  $0 < \epsilon < 1$  (π.χ.  $\epsilon = 0.77$ )  $\Rightarrow$  η ατμόσφαιρα απορροφά το 77% της IR που εκπέμπεται από τη Γη  $\Rightarrow T_s = 288 \text{ K} = +15^\circ\text{C}$

ο Έστω  $T_s = +15^\circ\text{C} \xrightarrow{(7)} \Rightarrow T_e = 242 \text{ K} < 255 \text{ K} \Rightarrow$



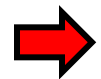
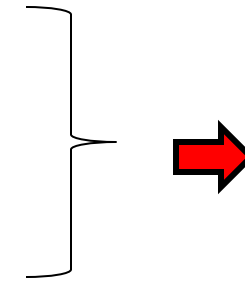
# Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

## ο Μοντέλο του ενός ατμοσφαιρικού στρώματος

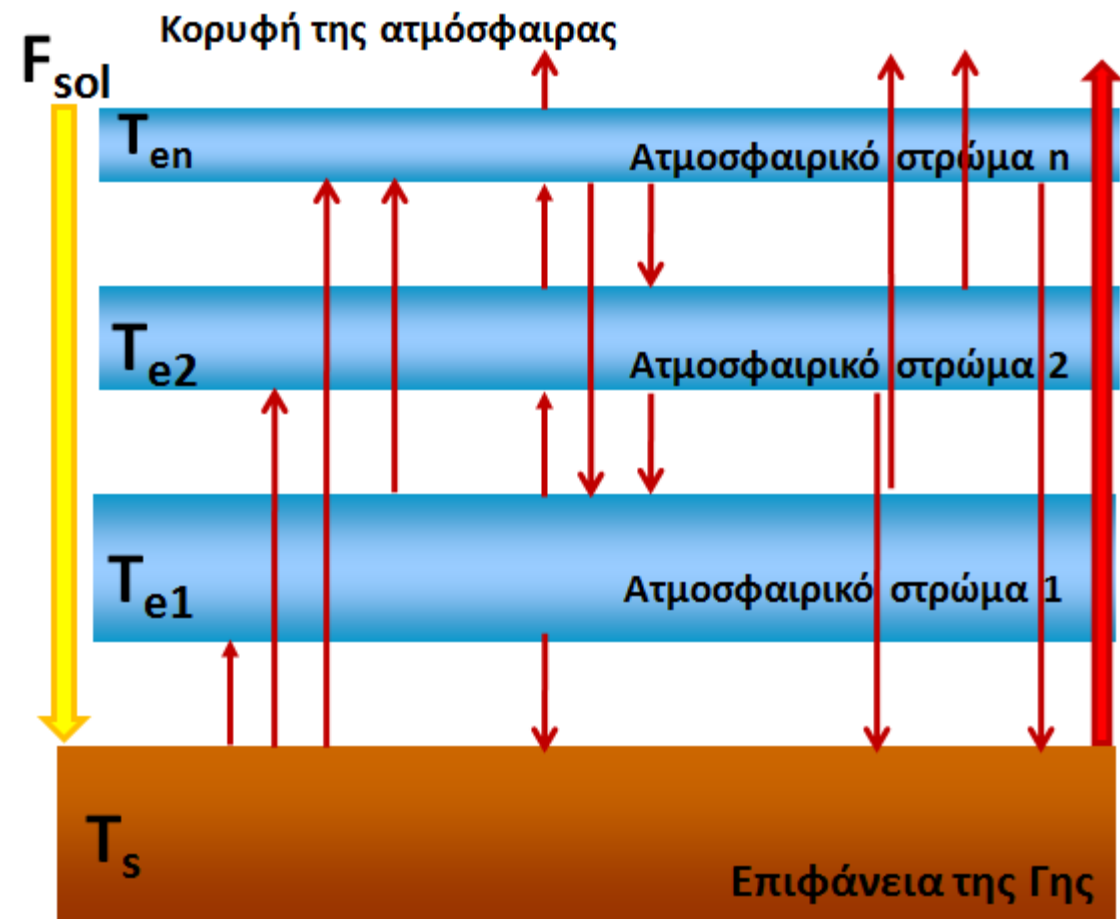
Το μοντέλο είναι απλό, η ατμόσφαιρα αποτελείται από διάφορα στρώματα

=>

Η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας παρουσιάζει ειδική θερμοβαθμίδα



Απαιτείται διαίρεση της ατμόσφαιρας σε στρώματα κατάλληλου πάχους





# Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

- Για να κατανοήσουμε το φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα πρέπει να ξέρουμε τις απορροφητικές ιδιότητες αυτής και τι ακριβώς συμβαίνει με την ακτινοβολία (υπέρυθρη ή μεγάλου μήκους κύματος) που εκπέμπεται από την επιφάνεια της Γης
- Η ατμόσφαιρα, παρότι δεν απορροφά σημαντικά την ηλιακή ακτινοβολία (απορροφά μόλις το 20% αυτής), απορροφά έντονα τη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία (υπέρυθρη) που εκπέμπει η Γη

Μάλιστα η **διαφάνεια** της ατμόσφαιρας ως προς την υπέρυθρη ακτινοβολία είναι **μικρή**. Είναι μόλις **0.1** δηλ. είναι αδιαφανής

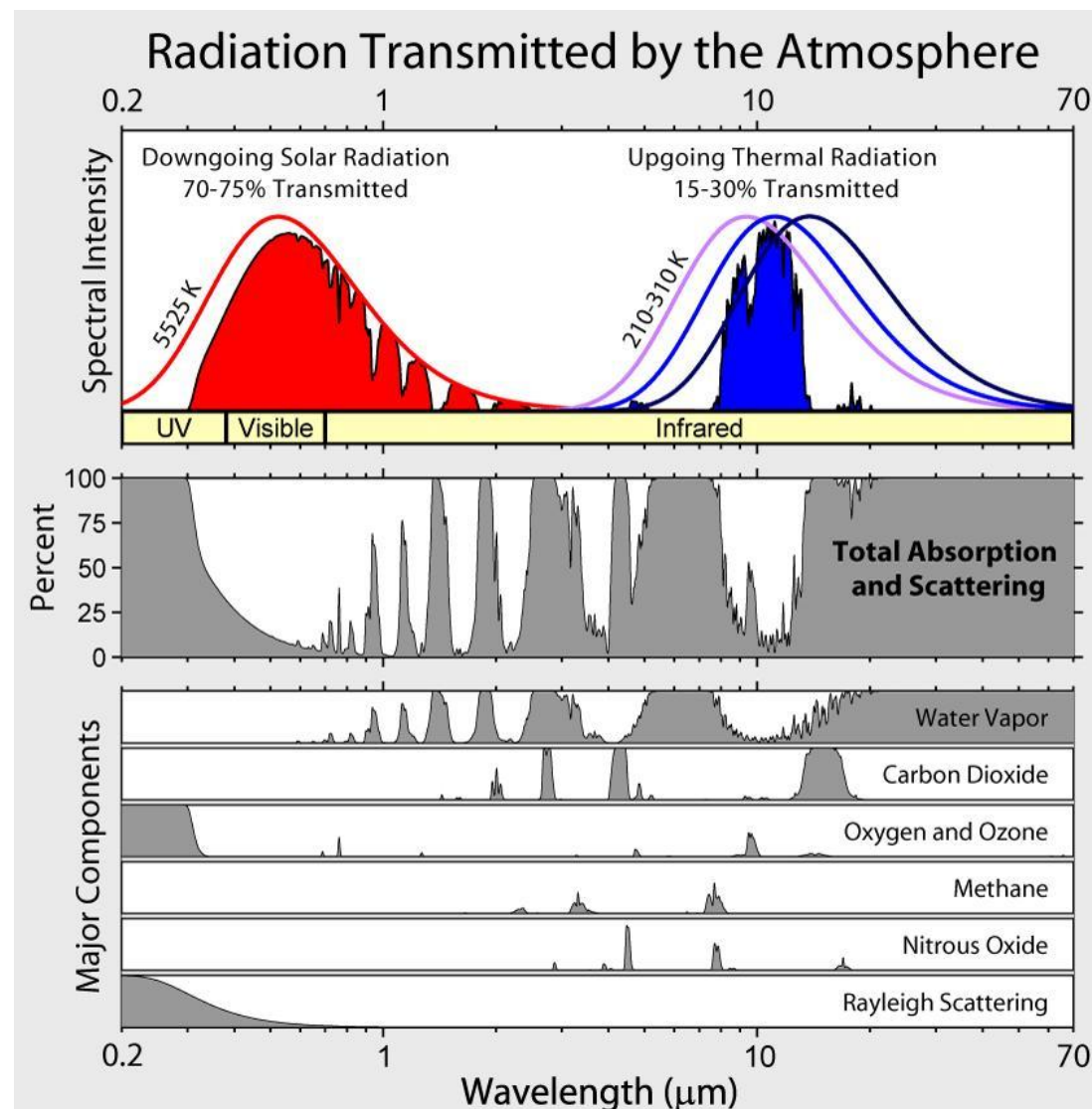
- Τα κύρια αέρια συστατικά της ατμόσφαιρας,  $N_2$  και  $O_2$ , **δεν απορροφούν** στην περιοχή που εκπέμπει η γήινη επιφάνεια δηλ. **δεν απορροφούν υπέρυθρη ακτινοβολία**
- Η μικρή διαφάνεια της ατμόσφαιρας ως προς τη γήινη ακτινοβολία οφείλεται στην παρουσία δευτερευόντων συστατικών, όπως των υδρατμών ( $H_2O$ ), του  $CO_2$  και του  $O_3$ . Αέρια που είναι γνωστά ως **αέρια του θερμοκηπίου**, που απορροφούν έντονα υπέρυθρη ακτινοβολία



# Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

## ■ Τα Αέρια 'Θερμοκηπίου'

- 🌐 Υδρατμοί ( $\text{H}_2\text{O}$ )
- 🌐 Διοξείδιο του Άνθρακα ( $\text{CO}_2$ )
- 🌐 Μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ )
- 🌐 Οξείδια Αζώτου ( $\text{N}_2\text{O}$ )
- 🌐 Όζον ( $\text{O}_3$ )
- 🌐 Υδροφθοροχλωράνθρακες (CFCs)



Πηγή: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmospheric\\_Transmission.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmospheric_Transmission.png)

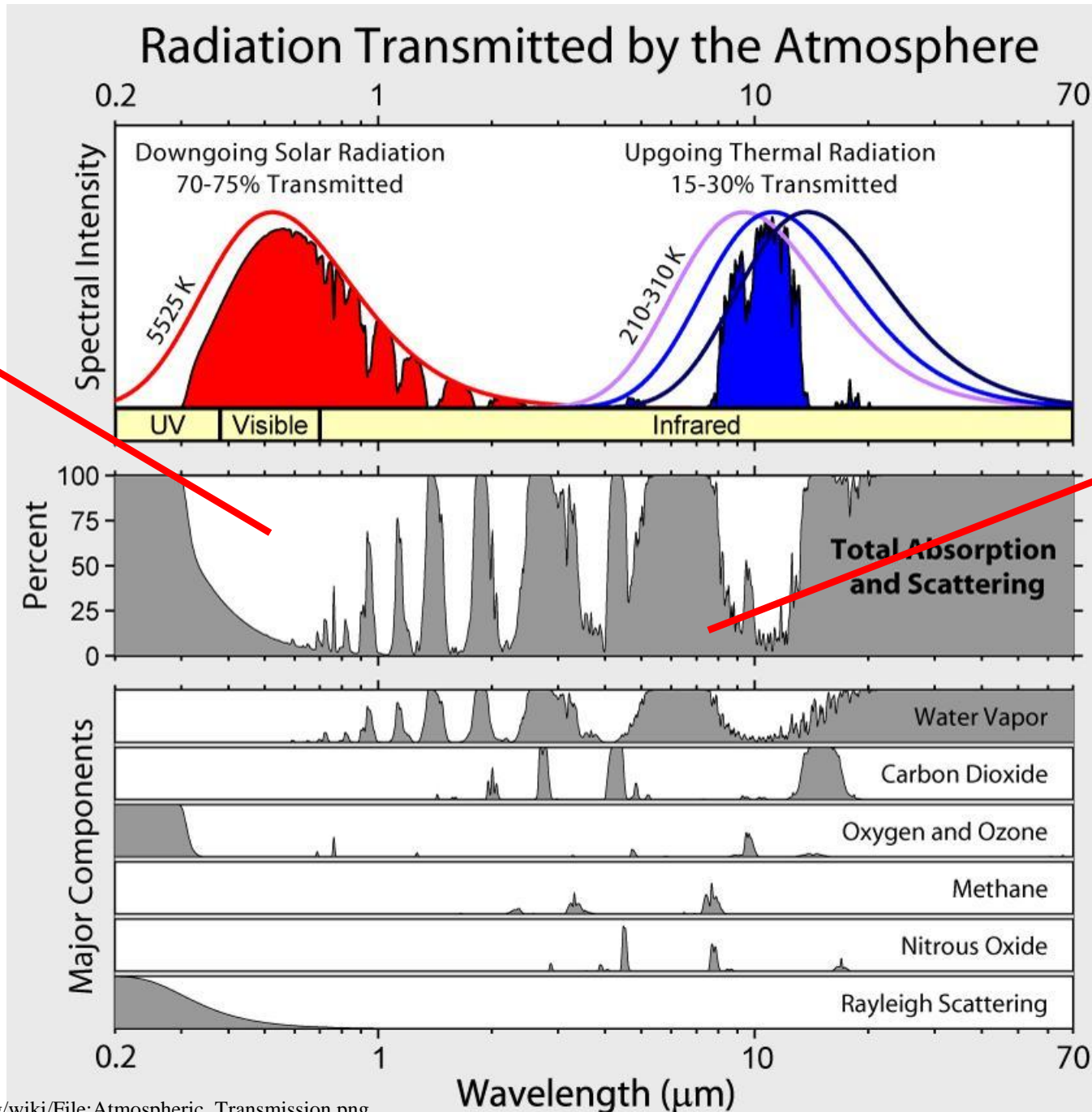
➤ Το πιο σημαντικό αέριο του Θερμοκηπίου είναι οι υδρατμοί ( $\text{H}_2\text{O}$ ), και ακολούθως το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ )

➤ Σημαντικό ρόλο στο φαινόμενο του θερμοκηπίου παίζουν και τα νέφη που αποτελούνται από διάφορες μορφές του νερού



# Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

Το συνολικό φάσμα απορρόφησης της Ατμόσφαιρας της Γης ως προς την ηλιακή και τη Γήινη ακτινοβολία



Η ατμόσφαιρα είναι σχετικά Διαφανής ως προς την ηλιακή ακτινοβολία

Μικρή εξασθένιση στην περιοχή με τη μέγιστη ένταση της ακτινοβολίας

Η ατμόσφαιρα είναι σχετικά Αδιαφανής ως προς τη γήινη ακτινοβολία

⇒ Συνολική Εξασθένιση

⇒ Υδατμοί ( $\text{H}_2\text{O}$ )

⇒ Διοξείδιο του Άνθρακα ( $\text{CO}_2$ )

⇒ Οξυγόνο & Όζον ( $\text{O}_2$  &  $\text{O}_3$ )

⇒ Μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ )

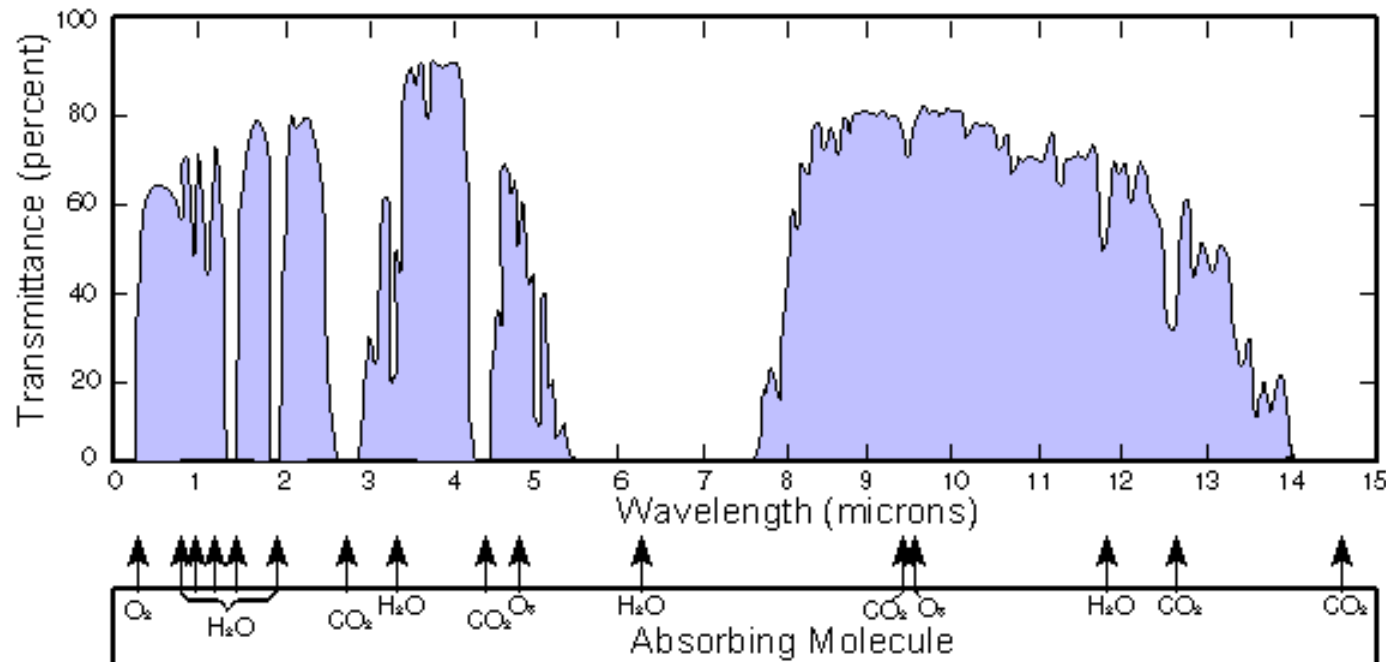
⇒ Υποξείδιο του Αζώτου ( $\text{N}_2\text{O}$ )

⇒ Σκέδαση Rayleigh



# Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

- Τα χαρακτηριστικά του συνολικού φάσματος απορρόφησης της Ατμόσφαιρας της Γης

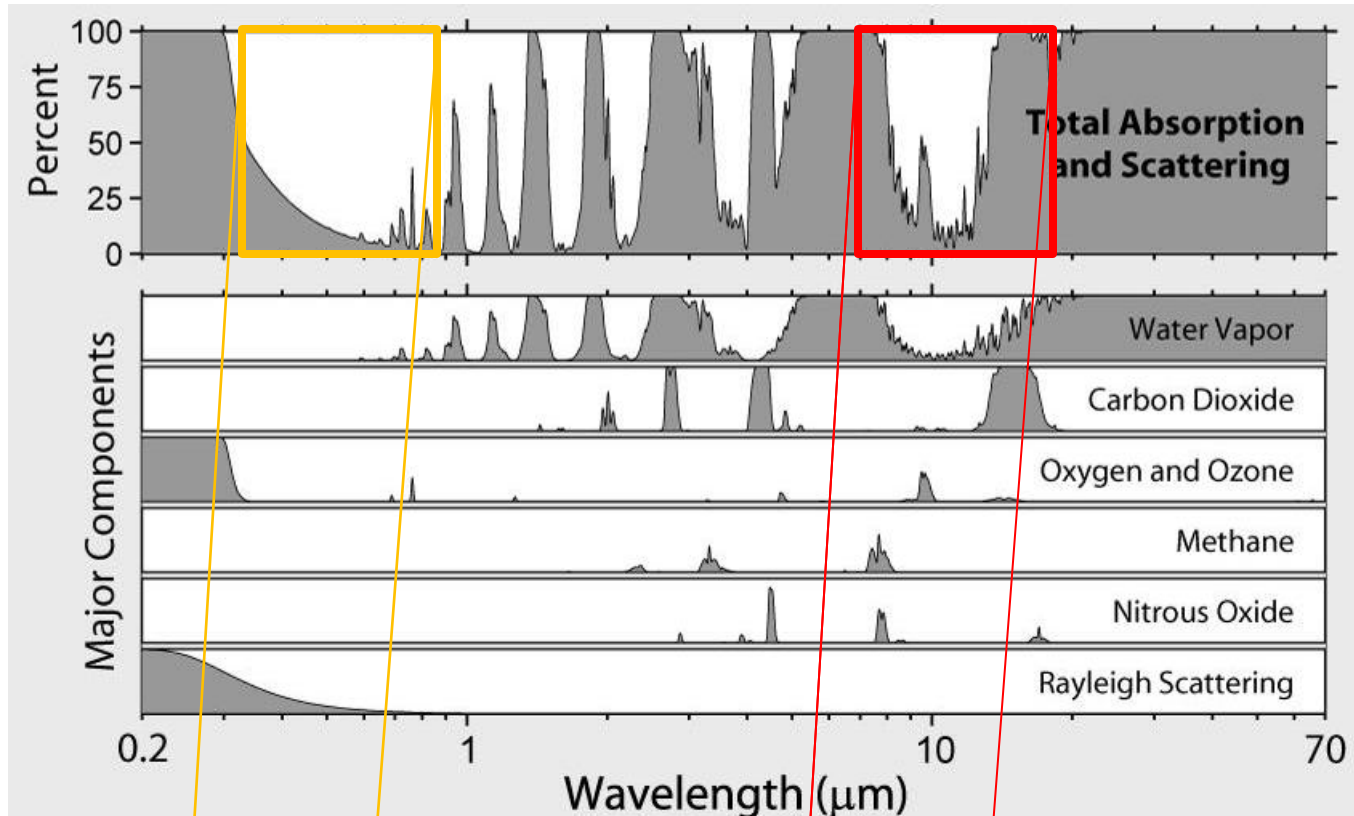


Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared\\_window](https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared_window)

- Κάτω από τα 5  $\mu\text{m}$  το ποσό της Γήινης ακτινοβολίας είναι ασήμαντο και επομένως η απορρόφηση της από τα αέρια της ατμόσφαιρας στην περιοχή αυτή είναι πολύ μικρή
- Μεταξύ 5 και 8  $\mu\text{m}$  παρατηρείται ισχυρή απορρόφηση λόγω της παρουσίας των υδρατμών (H<sub>2</sub>O), η οποία εξασθενεί μέχρι τα 13,5  $\mu\text{m}$
- Μεταξύ 13,5 και 17  $\mu\text{m}$  η ατμόσφαιρα είναι αδιαφανής λόγω του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>)
- Μεταξύ 17 και 24  $\mu\text{m}$  παρουσιάζει μικρή διαφάνεια
- Πέρα από τα 24  $\mu\text{m}$  η ατμόσφαιρα είναι αδιαφανής λόγω των υδρατμών (H<sub>2</sub>O)



# Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου



Παράθυρο ηλιακής ακτινοβολίας

Ατμοσφαιρικό παράθυρο

Πηγή: [http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Atmospheric\\_Absorption\\_Bands\\_png](http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Atmospheric_Absorption_Bands_png)

➤ Στην περιοχή μεταξύ **8 και 13,5  $\mu\text{m}$**  η ατμόσφαιρα παρουσιάζει **σημαντική διαφάνεια** (πολύ μικρή απορρόφηση)

➤ Παράλληλα αυτή η φασματική περιοχή συμπίπτει με το μέγιστο της εκπεμπόμενης από τη Γη υπέρυθρης ακτινοβολίας

➤ Η περιοχή αυτή του φάσματος είναι γνωστή ως **ατμοσφαιρικό παράθυρο**

➤ Από αυτή τη φασματική περιοχή ένα μέρος της Γήινης ακτινοβολίας (περίπου **9 %**) διαφεύγει στο διάστημα. Αποτέλεσμα αυτής της απώλειας είναι η παρατηρούμενη ψύξη κατά τη διάρκεια της νύχτας κοντά στο έδαφος

➤ Εδώ παίζουν σημαντικό ρόλο τα νέφη, τα οποία κατά τις νεφοσκεπείς νύχτες παρεμποδίζουν τη διαφυγή της υπέρυθρης ακτινοβολίας και να περιορίζεται η ψύξη

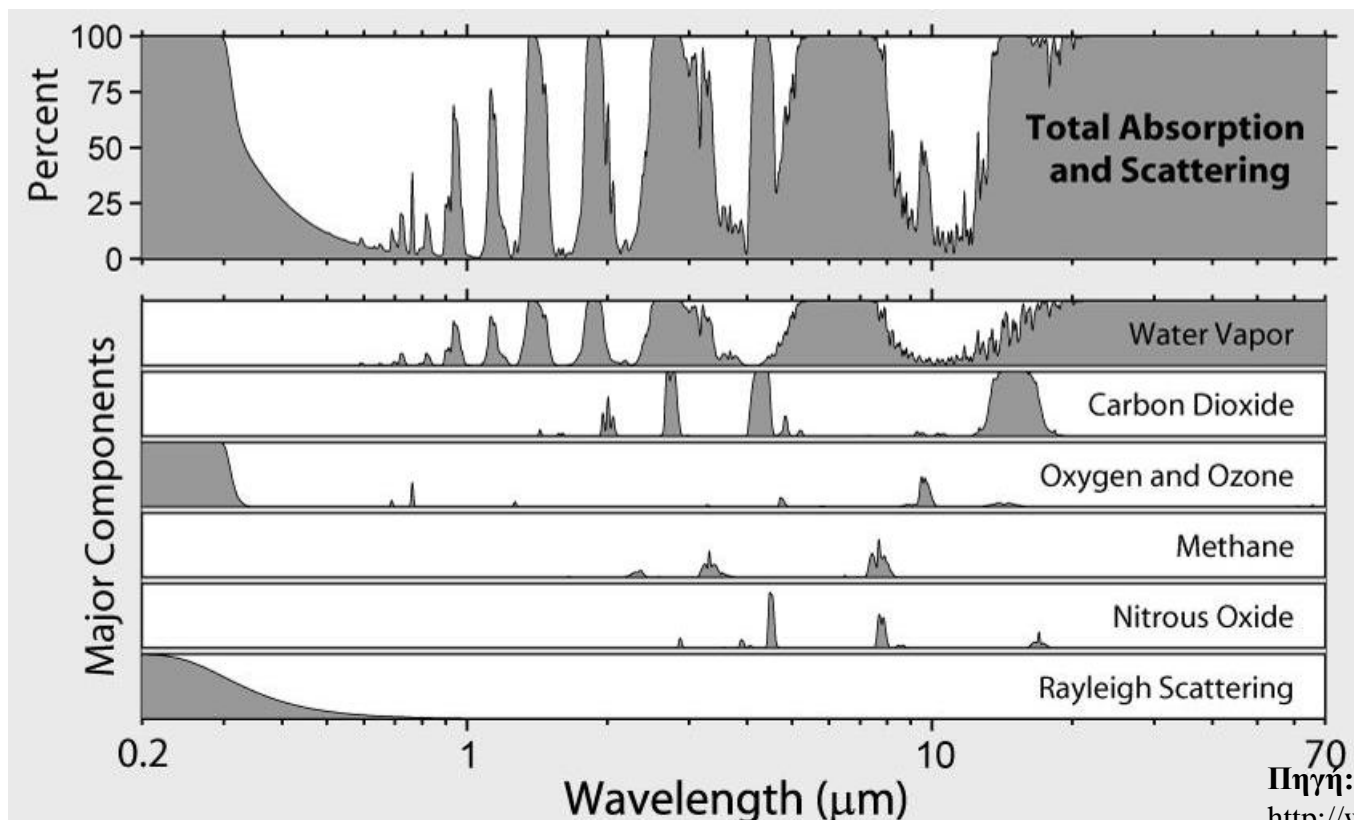
➤ Παρόλα αυτά σε αυτή τη φασματική περιοχή υπάρχει μια στενή έντονη ζώνη απορρόφησης που οφείλεται στο όζον (**O<sub>3</sub>**)



# Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

Τα χαρακτηριστικά του συνολικού φάσματος απορρόφησης της Ατμόσφαιρας της Γης ως προς τα κυριότερα αέρια του θερμοκηπίου

- H<sub>2</sub>O
- CO<sub>2</sub>
- O<sub>2</sub> & O<sub>3</sub>
- CH<sub>4</sub>
- N<sub>2</sub>O



Πηγή: [http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Atmospheric\\_Absorption\\_Bands\\_png](http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Atmospheric_Absorption_Bands_png)

Μήκος Κύματος (λ)	Αποτέλεσμα
$\lambda < 5 \mu\text{m}$	Ασήμαντη απορρόφηση
$5 \mu\text{m} \leq \lambda < 8 \mu\text{m}$	Ισχυρή απορρόφηση από υδρατμούς (H <sub>2</sub> O)
$8 \mu\text{m} \leq \lambda < 12 \mu\text{m}$	Ασθενής απορρόφηση από όζον (O <sub>3</sub> )
$12 \mu\text{m} \leq \lambda < 17 \mu\text{m}$	Ισχυρή απορρόφηση από διοξείδιο του άνθρακα (CO <sub>2</sub> )
$17 \mu\text{m} \leq \lambda < 19 \mu\text{m}$	Ασθενής απορρόφηση από υδρατμούς (H <sub>2</sub> O)
$\lambda \geq 19 \mu\text{m}$	Ισχυρή απορρόφηση από υδρατμούς (H <sub>2</sub> O)

⇒ Μεταβολές των συστατικών αυτών (κυρίως H<sub>2</sub>O και CO<sub>2</sub>) έχουν σημαντικό αντίκτυπο στη θερμοκρασιακή κατάσταση της ατμόσφαιρας και της επιφάνειας της Γης



## Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

Τα χαρακτηριστικά του συνολικού φάσματος απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από την Ατμόσφαιρα της Γης

**Εικόνα από:** <http://www.yale.edu/ceo/Documentation/GuideFig1.html>

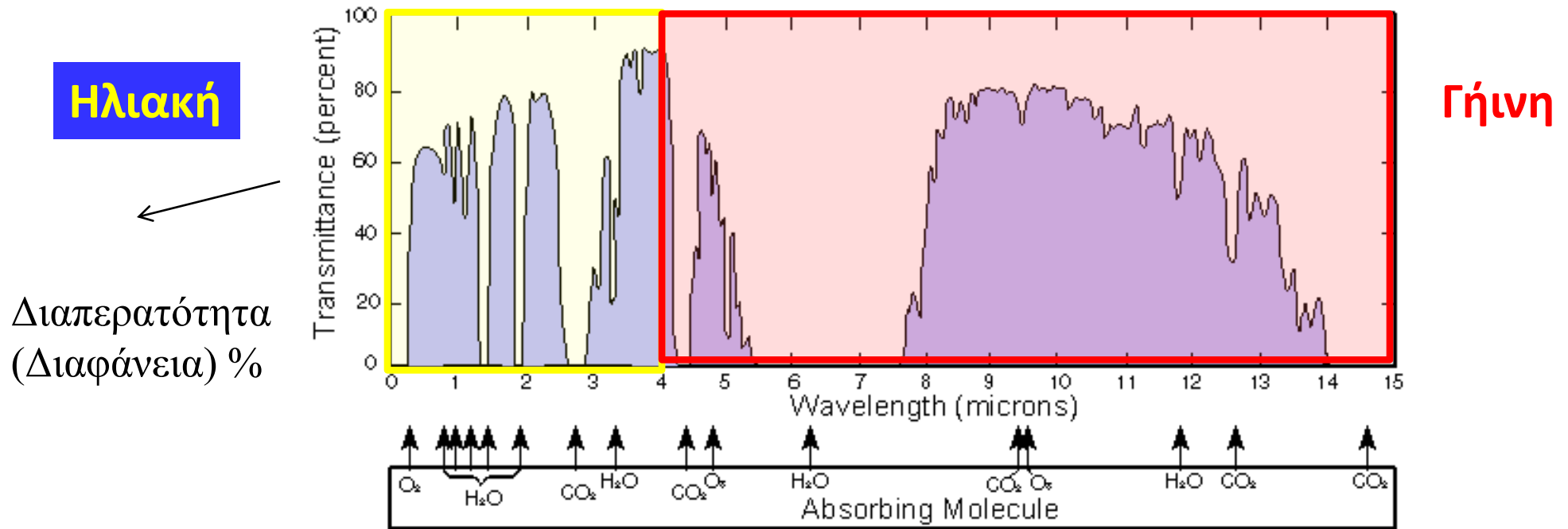
- ⇒ Από το τμήμα της ατμόσφαιρας που βρίσκεται πάνω από τα 11 Km (ύψος τροπόπαυσης στα μέσα γεωγραφικά πλάτη)
- ⇒ Από ολόκληρη την ατμόσφαιρα

- Επειδή το όζον ( $O_3$ ) βρίσκεται στη στρατόσφαιρα, η τροπόσφαιρα είναι διαφανής ως προς την υπέρυθρη ακτινοβολία στη περιοχή 8 με 13,5  $\mu\text{m}$  και γι' αυτό καλείται ατμοσφαιρικό παράθυρο
- Για τον ίδιο λόγο η απορρόφηση της υπεριώδους ακτινοβολίας είναι σημαντική ήδη στα 11 Km
- Επειδή η μεγαλύτερη ποσότητα των υδρατμών ( $H_2O$ ) περιέχεται στην τροπόσφαιρα, η απορρόφηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας από τους υδρατμούς είναι ισχυρή μέσα στην τροπόσφαιρα



# Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

Τα χαρακτηριστικά της Διαπερατότητας (Διαφάνειας) της Ατμόσφαιρας της Γης ως προς την ηλιακή και τη Γήινη ακτινοβολία



Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared\\_window](https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared_window)

Σχετικά μεγάλη διαφάνεια (διαπερατότητα) της Γήινης ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία

Σχετικά μικρή διαφάνεια (διαπερατότητα) της Γήινης ατμόσφαιρας στην γήινη (υπέρυθρη) ακτινοβολία



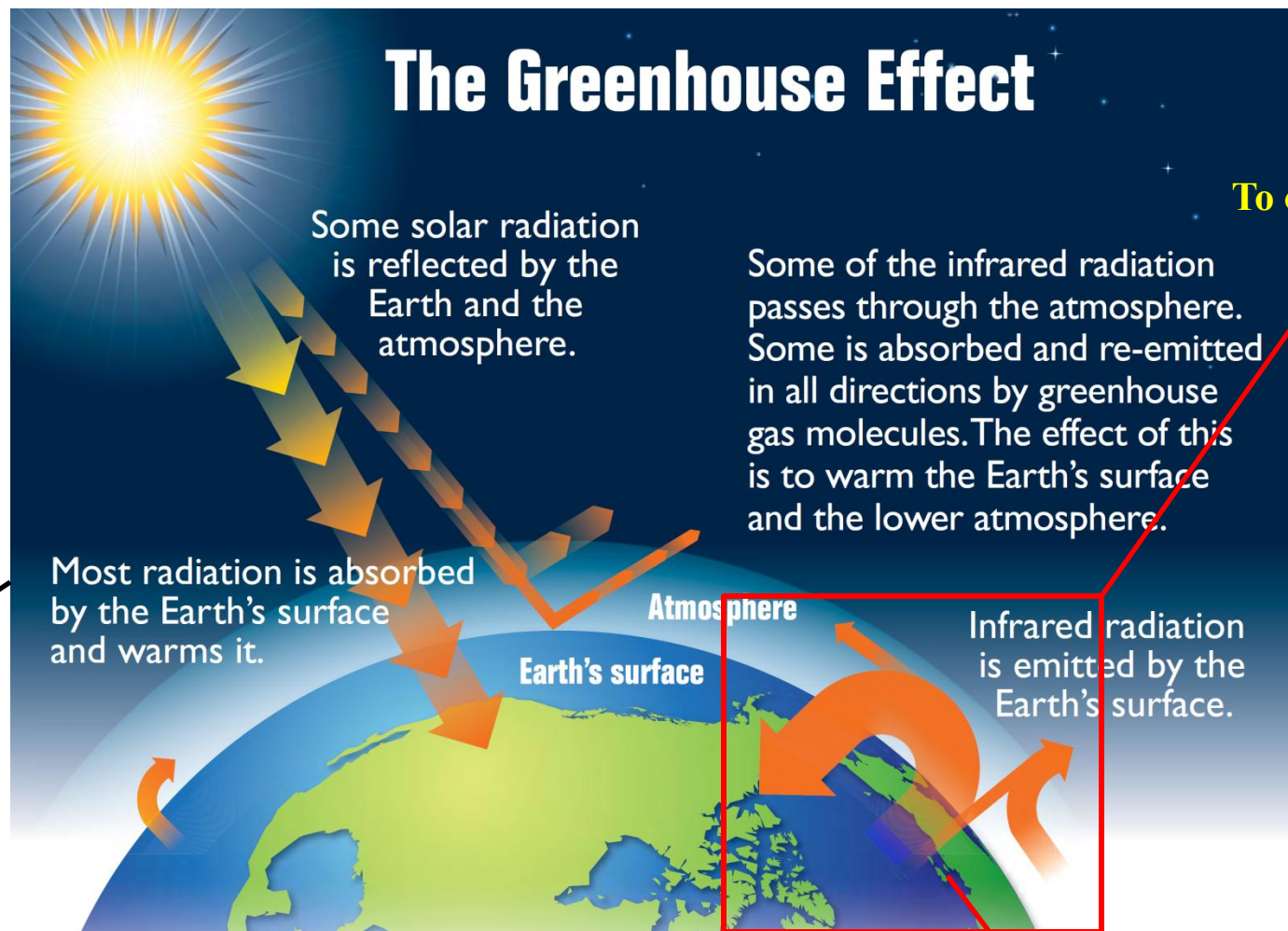


## Φαινόμενο του Θερμοκηπίου - Σύνοψη

- Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι ένας φυσικός μηχανισμός στην ατμόσφαιρα της Γης ο οποίος λειτουργεί ως εξής:
- Η Γη θερμαίνεται χάρη στην ιδιότητα της ατμόσφαιρας να είναι σχετικά διαφανής ως προς την ηλιακή ακτινοβολία επιτρέποντας την διέλευση της μέσα από αυτή (~50% της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην κορυφή της ατμόσφαιρας προσπίπτει στην επιφάνεια της Γης)
- Η Γη απορροφώντας σχεδόν το μισό της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην κορυφή της ατμόσφαιρας θερμαίνεται και αποκτά μία ορισμένη θερμοκρασία
- Σύμφωνα με τους νόμους της ακτινοβολίας, αφού η Γη έχει θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν ( $> -273 \text{ K}$ ) εκπέμπει και αυτή ακτινοβολία αλλά λόγω της θερμοκρασίας της εκπέμπει ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος (**υπέρυθρη**)
- Η ατμόσφαιρα εξ' αιτίας της ιδιότητας ορισμένων αερίων συστατικών της, γνωστών ως αέρια του θερμοκηπίου ( $\text{H}_2\text{O}$  ( $\Rightarrow$  άρα και τα νέφη),  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , ...) να απορροφούν την υπέρυθρη ακτινοβολία, απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας που εκπέμπει η Γη (~ 90%), θερμαίνεται σε θερμοκρασίες πολύ κοντά σε αυτές της επιφάνειας της Γης και επομένως εκπέμπει και αυτή υπέρυθρη ακτινοβολία. Το μεγαλύτερο μέρος μάλιστα το εκπέμπει προς την επιφάνεια Γης με αποτέλεσμα την περαιτέρω θέρμανση της επιφάνειας
- Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι ένα φυσικό φαινόμενο που συμβάλει σημαντικά στην ενεργειακή και θερμική ισορροπία του πλανήτη. Αν δεν λειτουργούσε ο συγκεκριμένος μηχανισμός η μέση θερμοκρασία της Γης θα ήταν  $-23^\circ\text{C}$



# Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου - Σύνοψη



Το φαινόμενο του Θερμοκηπίου

Σχεδόν το σύνολο της Γήινης ακτινοβολίας (90%) το απορροφούν τα αέρια του θερμοκηπίου της ατμόσφαιρας και επανεκπέμπουν το μεγαλύτερο μέρος προς την επιφάνεια της γης

Το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας φτάνει στην επιφάνεια της Γης και τη θερμαίνει

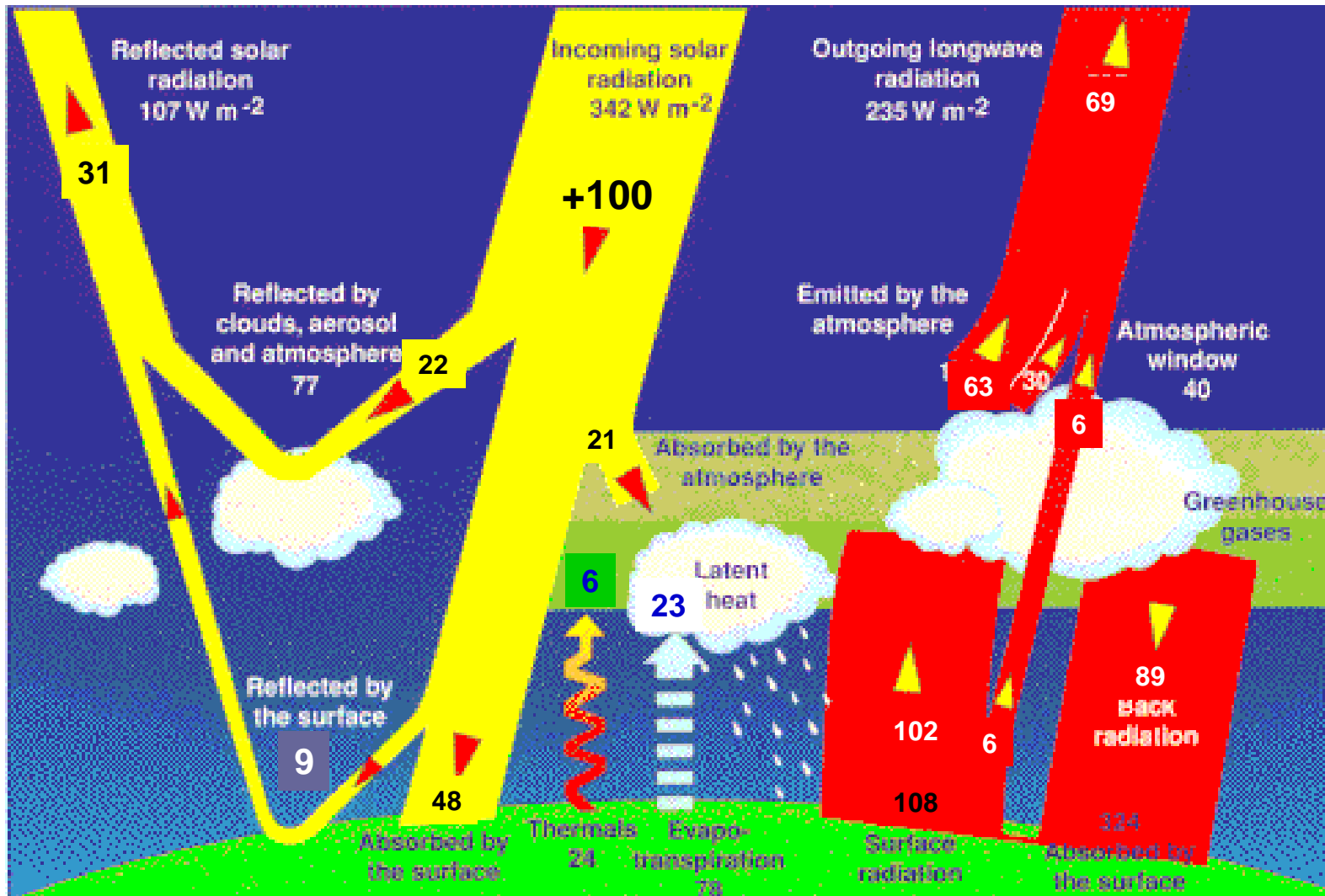
Πηγή: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth%27s\\_greenhouse\\_effect\\_%28US\\_EPA,\\_2012%29.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth%27s_greenhouse_effect_%28US_EPA,_2012%29.png)

Η Γη εκπέμπει και αυτή ακτινοβολία στην περιοχή του υπέρυθρου (υπέρυθρη ακτινοβολία)



# Ενεργειακό Ισοζύγιο του Πλανήτη

- Το Σύστημα Γη-Ατμόσφαιρα βρίσκεται σε Ενεργειακή Ισορροπία:



Πηγή: adapted from: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/CloudsInBalance/>

Καθαρή Εισερχόμενη  
Ηλιακή Ακτινοβολία

=

Εξερχόμενη  
Γήινη Ακτινοβολία

- Ισχύει μόνο σε:
- ✓ Πλανητική κλίμακα
- ✓ Μέση Ετήσια Βάση

• Παρότι η μέση τιμή της  $T$  σε διάφορες περιοχές της Γης μπορεί να μεταβάλλεται, ίσως και σημαντικά, από χρόνο σε χρόνο, το μέσο θερμικό ισοζύγιο ολόκληρου του πλανήτη μεταβάλλεται ανεπαίσθητα σε ετήσια βάση => το Σύστημα Γη-Ατμόσφαιρα αποβάλλει στο διάστημα την ίδια ποσότητα ενέργειας που λαμβάνει από τον Ήλιο

• Το ίδιο ισχύει και στην επιφάνεια της Γης. Σε ετήσια βάση η γήινη επιφάνεια θα πρέπει να επιστρέφει στην ατμόσφαιρα το ίδιο ποσό ενέργειας με αυτό που απορροφά



## Ενεργειακό Ισοζύγιο του Πλανήτη

- **Ενεργειακό ισοζύγιο:** η διαφορά ενέργειας μεταξύ της εισερχόμενης και εξερχόμενης ενέργειας στο σύστημα Γη-ατμόσφαιρα για μια μεγάλη χρονική περίοδο
- Έστω **100 μονάδες** ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται από το διάστημα στην κορυφή της ατμόσφαιρας κατά τη διάρκεια ενός έτους, τότε η ενέργεια αυτή κατανέμεται στο σύστημα Γη-ατμόσφαιρα ως εξής:
  - **31 μονάδες** επιστρέφουν στο διάστημα λόγω ανάκλασης από τα νέφη και την επιφάνεια της Γης, καθώς και λόγω σκέδασης από τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας
  - **21 μονάδες** απορροφούνται από την ατμόσφαιρα. **2** εν των οποίων απορροφούνται πάνω από την τροπόσφαιρα (κυρίως από το στρατοσφαιρικό όζον) και **19** μέσα στην τροπόσφαιρα από τα αέρια μόρια και τα σωματίδια
  - **48 μονάδες** απορροφώνται τελικά από την επιφάνεια της Γης δηλαδή η επιφάνεια της Γης απορροφά περισσότερη ενέργεια από ότι η ατμόσφαιρα (21 μονάδες). Αυτό θα είχε σαν αποτέλεσμα την συνεχή θέρμανση της Γης, γεγονός το οποίο όμως δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα



Θα πρέπει λοιπόν να υπάρχει ένας μηχανισμός [ου θα επιφέρει ισορροπία μεταξύ της Γης και της ατμόσφαιρας. Η επιφάνεια της Γης ψύχεται με τρεις τρόπους



# Ενεργειακό Ισοζύγιο του Πλανήτη

- με τη εκπομπή της υπέρυθρης ακτινοβολίας της Γης (γήινη ακτινοβολία)**: η Γη εκπέμπει μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία (υπέρυθρη) στην περιοχή από 4 έως 100  $\mu\text{m}$  με μέγιστη ένταση γύρω στα 10  $\mu\text{m}$  περίπου ίση με **108 μονάδες**. Τα αέρια της ατμόσφαιρας (γνωστά ως αέρια του θερμοκηπίου), κυρίως οι υδρατμοί ( $\text{H}_2\text{O}$ ) και το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) απορροφούν μέρος της γήινης ακτινοβολίας (**102 μονάδες**). Η ατμόσφαιρα θερμαίνεται και εκπέμπει με τη σειρά της υπέρυθρη ακτινοβολία (ατμοσφαιρική ή θερμική ακτινοβολία). Από αυτή **89 μονάδες** εκπέμπονται προς το έδαφος. Οι υπόλοιπες **6 μονάδες** από τις 108 που εκπέμπει η Γη διαφεύγουν άμεσα στο διάστημα μέσω του ατμοσφαιρικού παραθύρου. Τελικά η επιφάνεια της Γης χάνει 108 μονάδες και ξαναπαίρνει τις 89 από αυτές μέσω της ατμοσφαιρικής ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα να χάνει συνολικά  $108-89 = \underline{\underline{19 \text{ μονάδες}}}$
- Με τις κατακόρυφες κινήσεις της ατμόσφαιρας**: οι οποίες μεταφέρουν θερμές αέριες μάζες και συνεπώς θερμότητα (αισθητή θερμότητα) στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας (**6 μονάδες**) από τα κατώτερα τα οποία θερμαίνονται από της επαφή τους με την επιφάνεια της Γης. Οι ανοδικές κινήσεις των αερίων μαζών οφείλονται σε δυναμικά αίτια (μέτωπα, βουνά, εμπόδια) ή/και θερμικά αίτια (θέρμανση του εδάφους)
- Με τους υδρατμούς της ατμόσφαιρας**: οι οποίοι κατά τη δημιουργία τους με την εξάτμιση των υδάτινων επιφανειών μεταφέρουν ενέργεια (λανθάνουσα θερμότητα) από την Γη στην τροπόσφαιρα. Η ενέργεια αυτή αντιστοιχεί σε **23 μονάδες** και αποθηκεύεται στους υδρατμούς κατά την εξάτμιση των υδάτινων επιφανειών και μεταφέρεται στην ατμόσφαιρα όπου αποδίδεται κατά τη συμπύκνωση τους και τη δημιουργία νεφών



## Ενεργειακό Ισοζύγιο του Πλανήτη

■ Συνολικά η επιφάνεια της Γης χάνει μέσω της γήινης ακτινοβολίας, της λανθάνουσας θερμότητας και των κατακόρυφων κινήσεων που μεταφέρουν αισθητή θερμότητα  $\underline{-19 + (-6) + (-23) = -48 \text{ μονάδες}}$  όσες δηλαδή απορροφά από την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία και έτσι **στην επιφάνεια της Γης το σύστημα ισορροπεί**. Αν δεν υπήρχαν αυτοί οι μηχανισμοί η επιφάνεια της Γης θα ήταν  $40^{\circ}\text{C}$  θερμότερη, ενώ η ατμόσφαιρα θα ήταν ψυχρότερη από όσο είναι στην πραγματικότητα

■ Πλανήτη (σύνολο του συστήματος Γη-ατμόσφαιρα) δηλαδή το ενεργειακό ισοζύγιο στην κορυφή της ατμόσφαιρας: χάνει προς το διάστημα **31 μονάδες** από την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία και **69 μονάδες** από την εξερχόμενη γήινη (**6** άμεσα από την Γη + **63** εκπέμπει ατμοσφαιρική ακτινοβολία η ατμόσφαιρα). Επομένως, το σύστημα χάνει  $\underline{-31 + (-69) = -100 \text{ μονάδες}}$  και έτσι το σύστημα συνολικά ισορροπεί αφού αντισταθμίζει τις **+100 μονάδες** που λαμβάνει



## Ενεργειακό Ισοζύγιο του Πλανήτη

■ Αντίστοιχη ισορροπία ισχύει και για την **ατμόσφαιρα της Γης**, η οποία απορροφά **21 μονάδες** από την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία και **102 μονάδες** από την εκπεμπόμενη μεγάλου μήκους γήινη ακτινοβολία. Παράλληλα, δέχεται **6** και **23 μονάδες** από την κατακόρυφη μεταφορά αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας αντίστοιχα. Επομένως, δέχεται συνολικά **21 + 102 + 6 + 23 = +152 μονάδες ενέργειας**. Η ίδια η ατμόσφαιρα εκπέμπει μεγάλου μήκους κύματος ατμοσφαιρική ακτινοβολία **89 μονάδες** προς την επιφάνεια της Γης και **63 μονάδες** προς το διάστημα, δηλαδή συνολικά **-89 + (-63) = -152 μονάδες** διασφαλίζοντας έτσι τη θερμικής ισορροπία της ατμόσφαιρας

■ Η ατμόσφαιρα της Γης θερμαίνεται περισσότερο από την γήινη ακτινοβολία παρά από την ηλιακή ακτινοβολία. Η θέρμανση όμως αυτή από την γήινη ακτινοβολία είναι πιο έντονη στα κατώτερα στρώματα της από ότι στα ανώτερα, με συνέπεια να δημιουργούνται συνεχώς κατακόρυφες κινήσεις και κατ' επέκταση τα διάφορα καιρικά φαινόμενα.

**Εικόνα από:** [http://www.goes-r.gov/users/comet/tropical/textbook\\_2nd\\_edition/print\\_1.htm](http://www.goes-r.gov/users/comet/tropical/textbook_2nd_edition/print_1.htm)

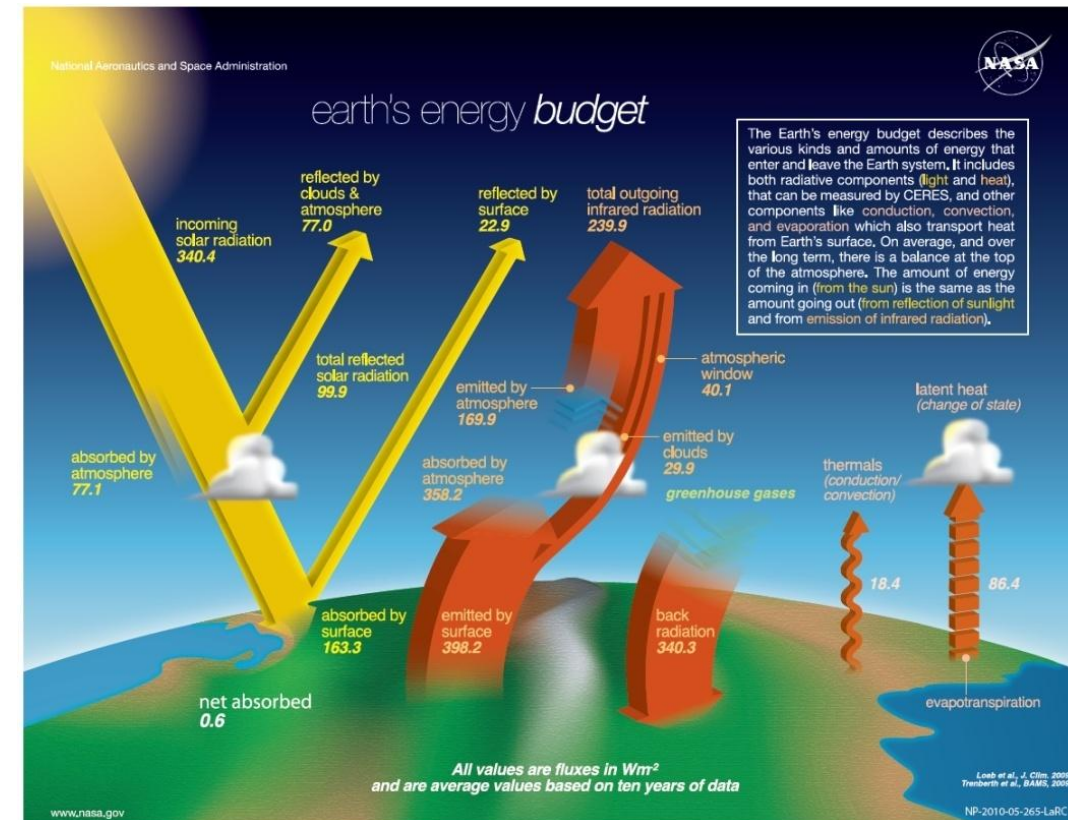
■ Αν η ατμόσφαιρα θερμαινόταν άμεσα από τον ήλιο και όχι από τη Γη, τότε θα θερμαινόταν περισσότερο στα ανώτερα στρώματα της ενώ τα κατώτερα θα ήταν πιο ψυχρά. Η κατάσταση αυτή δεν ευνοεί τις κατακόρυφες κινήσεις του αέρα και η ατμόσφαιρα θα ήταν σχεδόν ακίνητη ως προς την κατακόρυφο



# Ενεργειακό Ισοζύγιο του Πλανήτη

- Το Ενεργειακό Ισοζύγιο του Πλανήτη λόγω της μεγάλης σημασίας του βρίσκεται υπό συνεχή παρακολούθηση, καταγραφή και αναθεώρηση

The global annual mean Earth's energy budget for the March 2000 - May 2004 period ( $\text{W m}^{-2}$ ). The broad arrows indicate the schematic flow of energy in proportion to their importance. - From Trenberth et al., 2009



Ενεργειακό ισοζύγιο του Πλανήτη βάσει της δουλειάς των Trenberth et al, 2009 και Loeb et al., 2009 για την περίοδο Μάρτιος 2000- Φεβρουάριος 2005

Πηγή: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bb/The-NASA-Earth's-Energy-Budget-Poster-Radiant-Energy-System-satellite-infrared-radiation-fluxes.jpg>





## Πηγή:

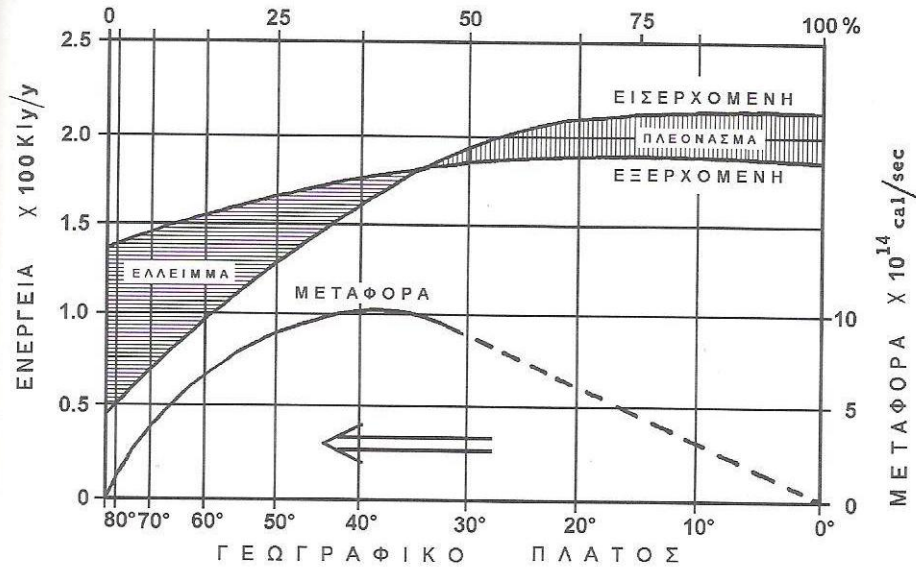
[https://www.e-education.psu.edu/earth540/content/c4\\_p2.html](https://www.e-education.psu.edu/earth540/content/c4_p2.html)

Ανομοιογενής χωρική κατανομή του ενεργειακού ισοζυγίου:

- **πλεόνασμα** στα μικρά γεωγραφικά πλάτη (**0° - 30° B & N**)
- **Έλλειμμα** στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη (**>30° B & N**)

Η προσπάθεια αποκατάστασης ενεργειακής ισορροπίας, μέσω μεταφοράς ενέργειας από τις περιοχές με πλεόνασμα προς τις περιοχές με έλλειμμα έχει σαν αποτέλεσμα τη **γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας** & τα **θαλάσσια ρεύματα**

# Ισοζύγιο Ακτιβολίας του Πλανήτη - Μεταβολή με το γεωγραφικό πλάτος



ΣΧΗΜΑ 2.4.2. Η μέση ετήσια κατά γεωγραφικό πλάτος κατανομή του ελλείμματος και του πλεονάσματος των ακτινοβολιών στο Βόρειο Ημισφαίριο. (Atmosphere. Weather and Climate R.B. Barn - R.J. Chorley)

Πηγή: Σαχσαράνογλου Χ.Σ. και Α.Α. Μπλούτσος, Φυσική κλιματολογία, 1998

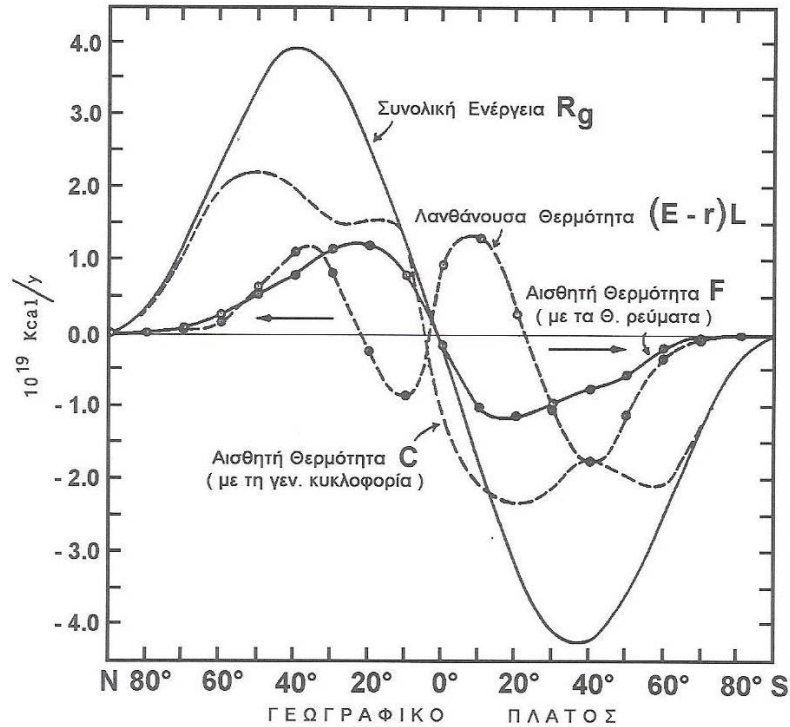


ΣΧΗΜΑ 2.4.1. Η μέση ετήσια κατά γεωγραφικό πλάτος κατανομή του ενεργειακού υπολοίπου των ακτινοβολιών της επιφάνειας της γης  $R_s$ , της ατμόσφαιρας  $R_a$  και του συστήματος γη - ατμόσφαιρα  $R_g$  (Physical Climatology. W. D. SELLERS).

Πηγή: Σαχσαράνογλου Χ.Σ. και Α.Α. Μπλούτσος, Φυσική κλιματολογία, 1998

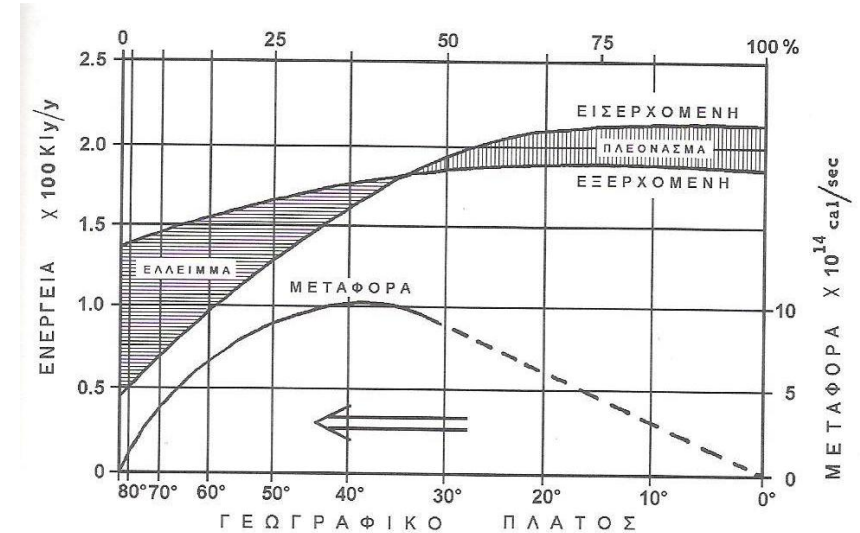
# Οριζόντια Μεταφορά Ενέργειας

- Η μεταφορά ενέργειας (θερμότητας) από τις περιοχές με πλεόνασμα προς τις περιοχές με έλλειμμα γίνεται αφενός από την γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας (αισθητή & λανθάνουσα θεομότητα) και αφετέρου με τα θαλάσσια ρεύματα (αισθητή θερμότητα)



Σχήμα 10.6.2 Η μέση ετήσια μεσημβρινή μεταφορά ενέργειας σε  $10^{19}$  Kcal/year (Physical Climatology, W.D. SELLERS).

Πηγή: Σαχσαράνογλου Χ.Σ. και Α.Α. Μπλούτσος, Φυσική κλιματολογία, 1998



ΣΧΗΜΑ 2.4.2. Η μέση ετήσια κατά γεωγραφικό πλάτος κατανομή του ελλείμματος και του πλεονάσματος των ακτινοβολιών στο Βόρειο Ημισφαίριο. (Atmosphere, Weather and Climate R.B. Barn - R.J. Chorley)

Πηγή: Σαχσαράνογλου Χ.Σ. και Α.Α. Μπλούτσος, Φυσική κλιματολογία, 1998

- Ατμοσφαιρική Κυκλοφορία: μεταφέρει το 75 % της ενέργειας

50 % ως αισθητή θερμότητα

Ισημερινό → πόλους

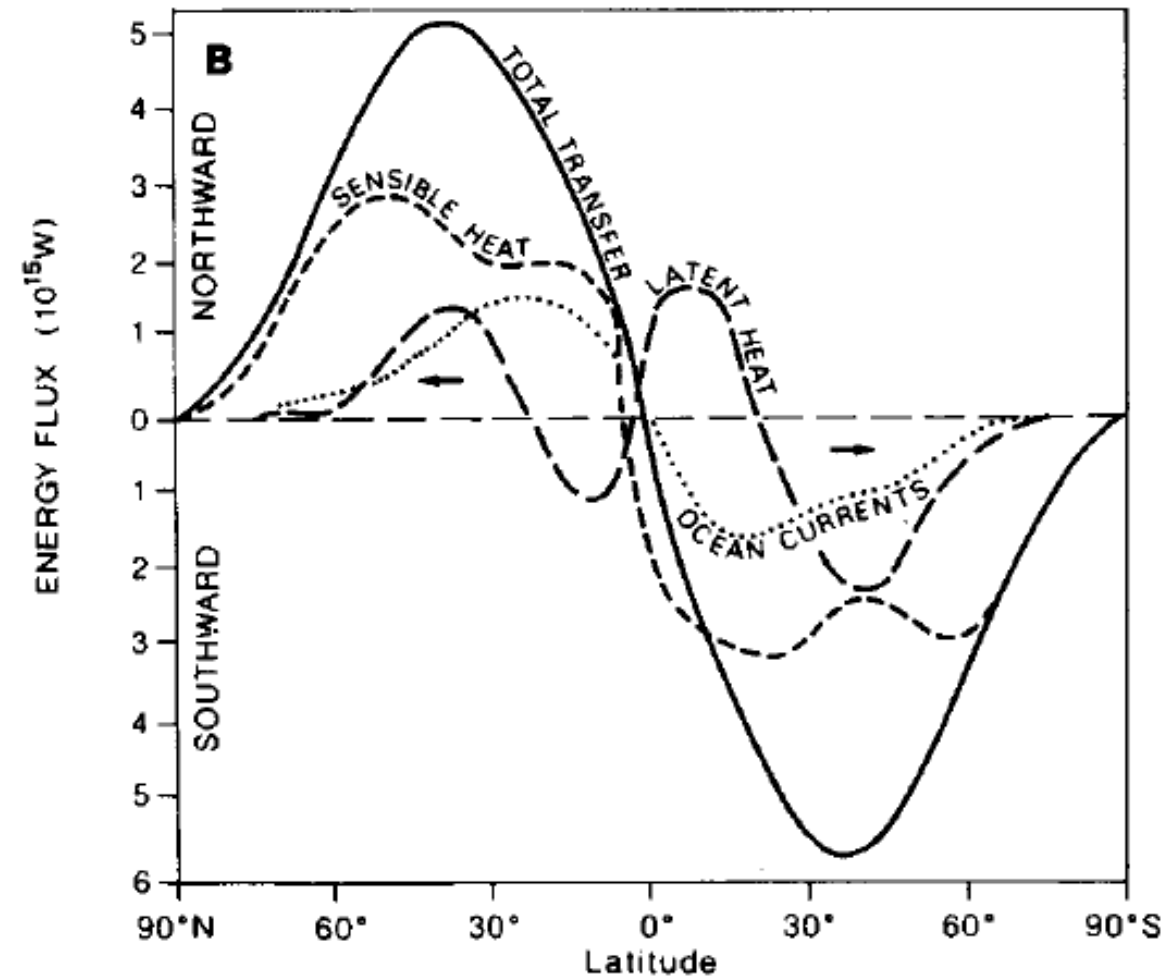
25 % ως λανθάνουσα θερμότητα

→ πόλους

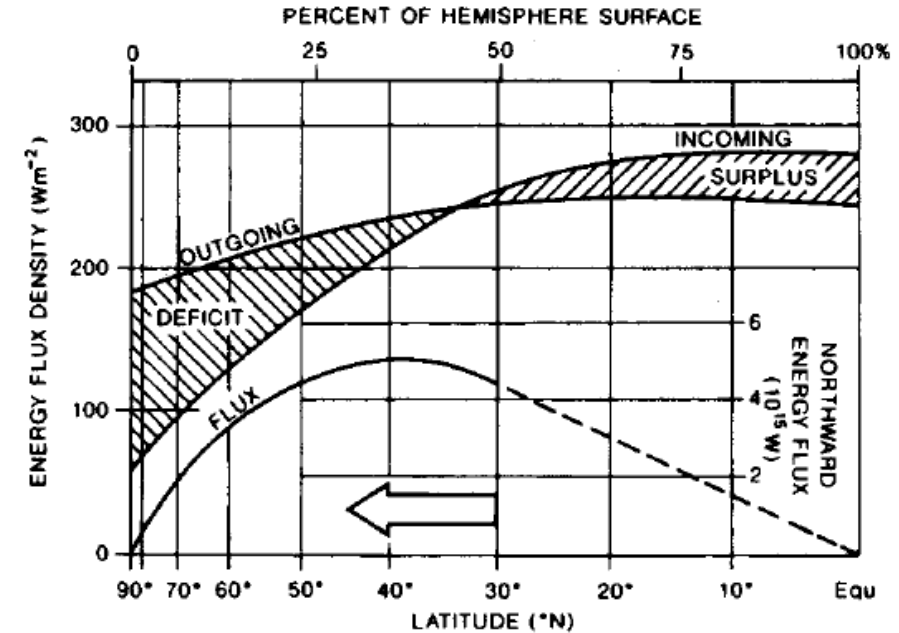
→ Ισημερινό (υποτροπικούς ωκεανούς 10°)

- Ωκεάνια Κυκλοφορία: μεταφέρει το 25 % της ενέργειας ⇒ αισθητή θερμότητα

# Οριζόντια Μεταφορά Ενέργειας



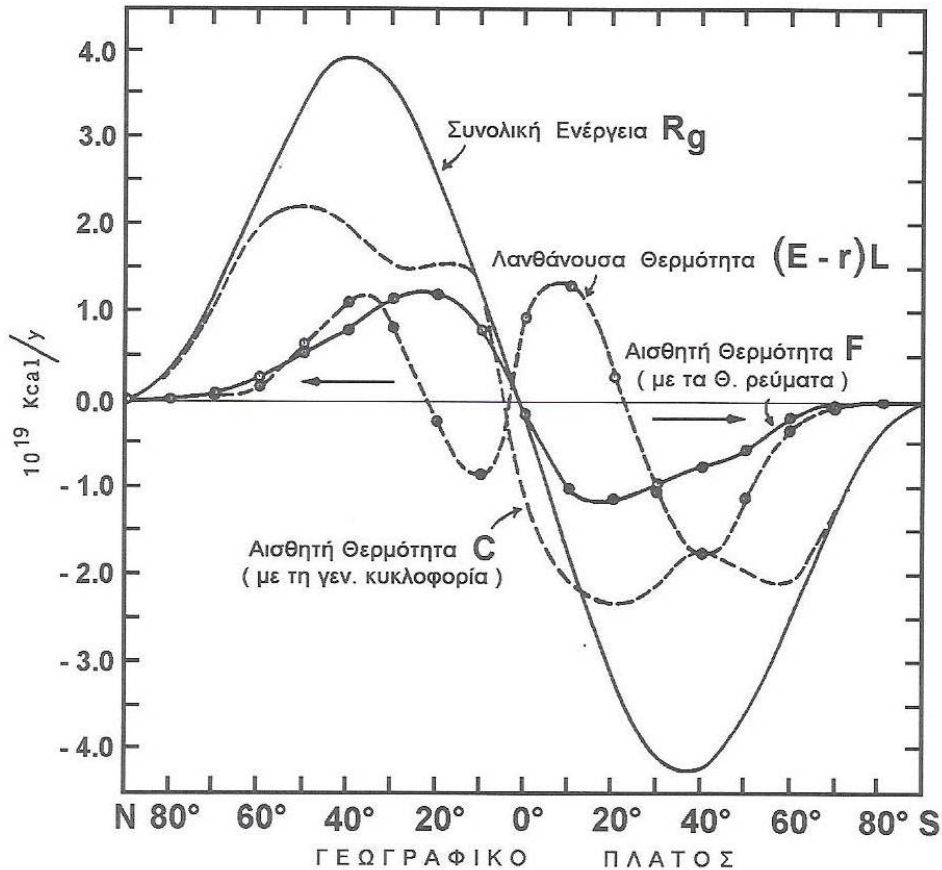
Πηγή: Σαχσαμάνογλου Χ.Σ. και Α.Α. Μπλούτσος, Φυσική κλιματολογία, 1998



Πηγή: Σαχσαμάνογλου Χ.Σ. και Α.Α. Μπλούτσος, Φυσική κλιματολογία, 1998

- **Λανθάνουσα θερμότητα:** καλύπτει το **20 – 25 %** της συνολικής μεταφερόμενης ενέργειας
- είναι το ποσό της θερμότητας που απορροφάται κατά την εξάτμιση & εξατμισοδιαπνοή
- Σε περιοχές με μικρό γεωγραφικό πλάτος ( $\sim 10^{\circ}$ ) οι υδρατμοί (λανθάνουσα θερμότητα) μεταφέρονται προς τον Ισημερινό, ενώ σε περιοχές με μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη ( $> 10^{\circ}$ ) οι υδρατμοί μεταφέρονται προς τους πόλους

# Μεταφορά Ενέργειας



Σχήμα 10.6.2 Η μέση ετήσια μεσημβρινή μεταφορά ενέργειας σε  $10^{19}$  Kcal/year (Physical Climatology, W.D. SELLERS).

Πηγή: Σαχσαμάνογλου Χ.Σ. και Α.Α. Μπλούτσος, Φυσική κλιματολογία, 1998

- **Αισθητή θερμότητα:** αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο ποσοστό θερμότητας που μεταφέρεται προς τους πόλους
- Η μεταφορά επιτυγχάνεται με την γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας και τα ωκεάνια ρεύματα
- Η ανωμαλία που εμφανίζεται στις περιοχές με γεωγραφικά πλάτη  $30^{\circ} - 40^{\circ}$  οφείλεται στις καθοδικές κινήσεις των αερίων εκεί (αντικυκλωνικά συστήματα στην επιφάνεια), οι οποίες στη συνέχεια κατευθύνονται προς τον ισημερινό
- Στις περιοχές με μεγάλα γεωγραφικά πλάτη  $50^{\circ} - 70^{\circ}$  στην συνολική ποσότητα θερμότητας που μεταφέρεται προς τους πόλους κυριαρχεί η ροή αισθητής θερμότητας

- Το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται με τα **θαλάσσια ρεύματα** αντιπροσωπεύει το **20 – 25 %** της συνολικής ποσότητας
- Από τη μεταφορά αυτή, η σημαντικότερη παρατηρείται σε περιοχές των μικρών γεωγραφικών πλατών

# Το ενεργειακό Ισοζύγιο στην επιφάνεια του εδάφους

## ■ Ενεργειακό Ισοζύγιο στο Έδαφος

$$R_{Net} - G - LE - H + F_1 - F_2 = 0$$

Καθαρή Ηλιακή ακτινοβολία

Καθαρή Υπέρουθρη ακτινοβολία

$$R_{Net} = F_{SW\downarrow} - F_{LW\uparrow}$$

Η καθαρή ακτινοβολία

LE

Η λανθάνουσα θερμότητα (LE < 0, για την εξάτμιση του νερού)

H

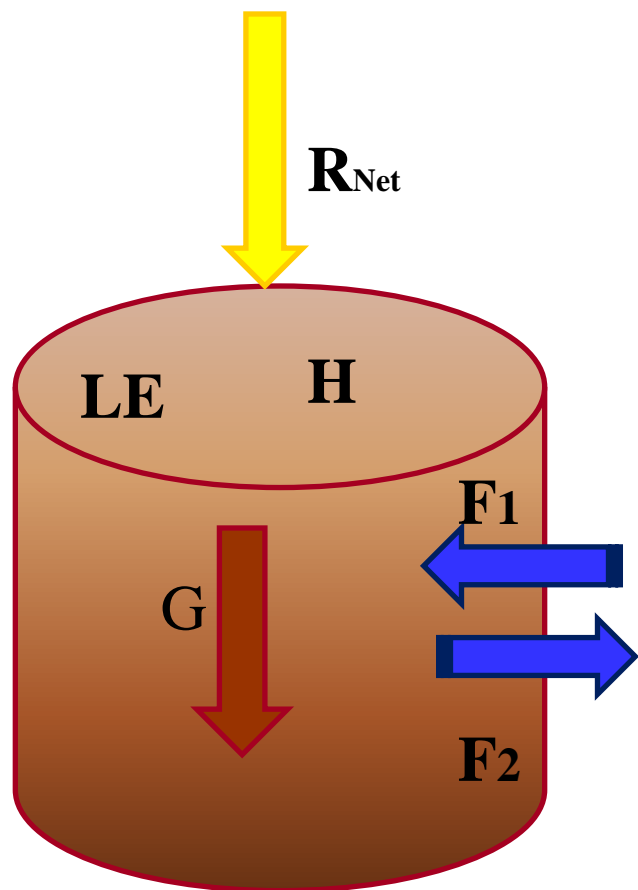
Η αισθητή θερμότητα (H < 0, για αύξηση της θερμοκρασία)

G

Η κατακόρυφη ροή θερμότητας μέσα στο έδαφος (G < 0, για ροή προς τα κάτω)

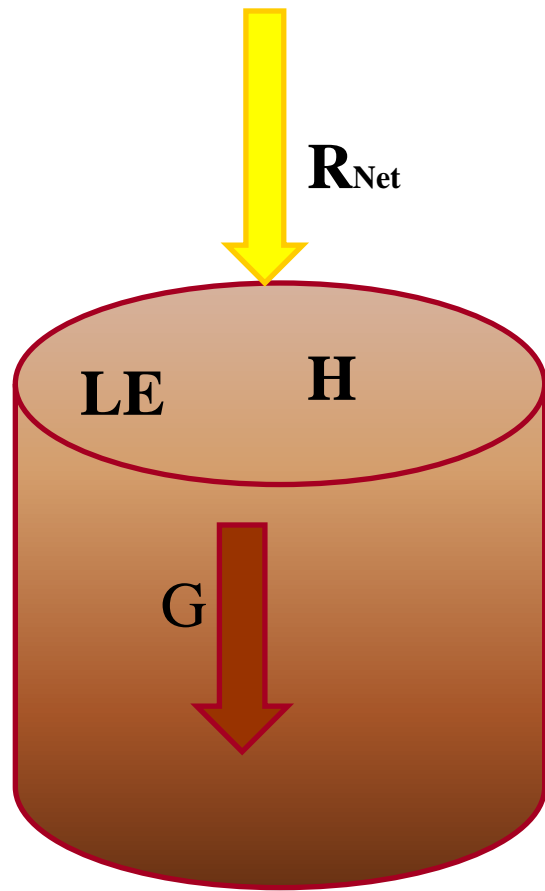
F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>

Η οριζόντια ροή θερμότητας μέσα στο έδαφος



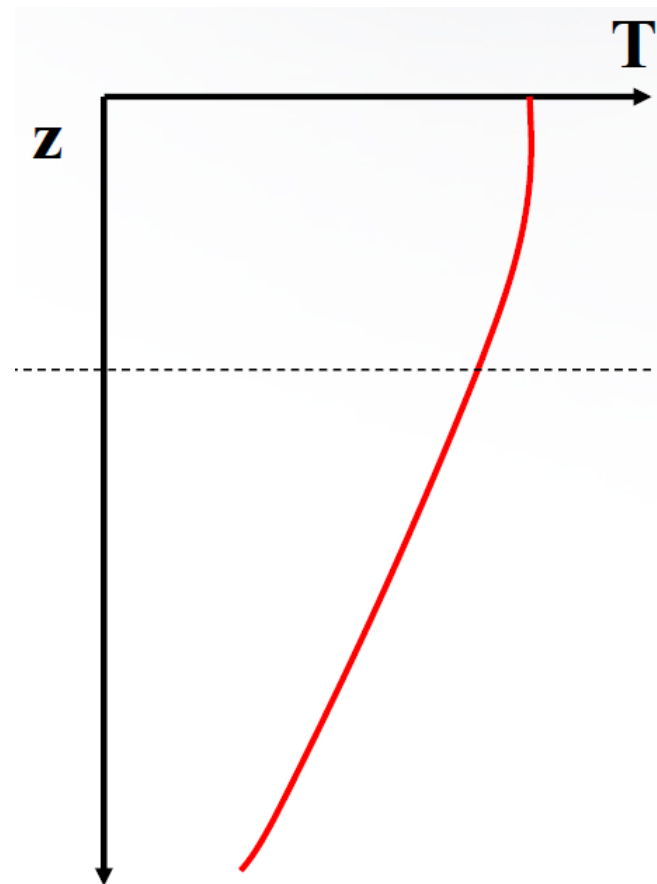
Για  $F_1 = F_2 \Rightarrow R_{Net} - G - LE - H = 0$

# Το ενεργειακό Ισοζύγιο στο έδαφος



**G** Η κατακόρυφη ροή θερμότητας μέσα στο έδαφος που διέρχεται μέσα από μια επιφάνεια

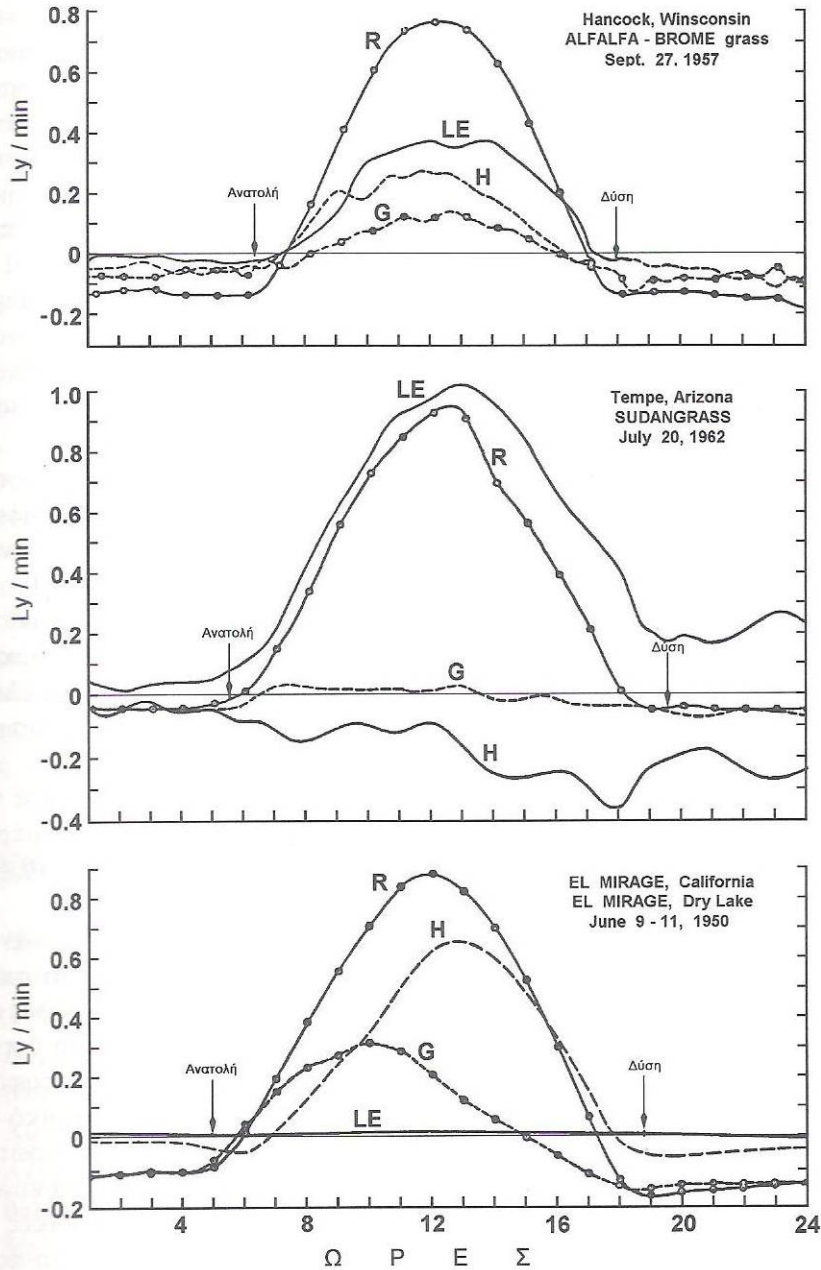
$$G = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta z} \Rightarrow G > 0 \text{ όταν } \Delta T / \Delta z < 0$$



$\lambda$  = συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

- Η τιμή του  $G$  αυξάνει όταν αυξάνει η υγρασία του εδάφους
- Η τιμή του  $G$  είναι αυξημένη για εδάφη με οργανική ύλη

# Το ενεργειακό Ισοζύγιο στην επιφάνεια του εδάφους



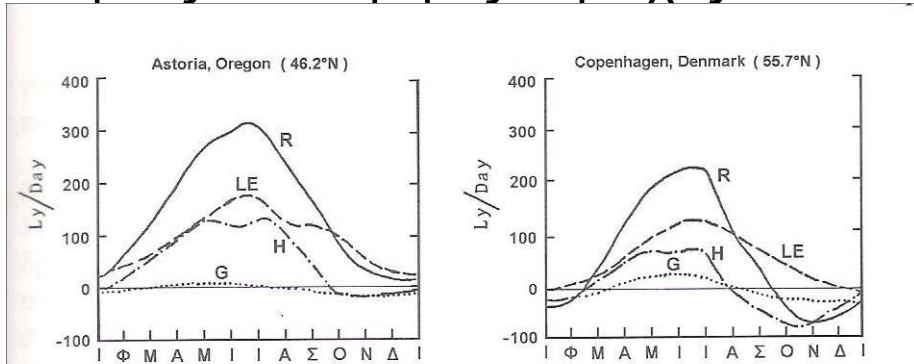
Μέση ημερήσια μεταβολή των συνιστωσών του ενεργειακού ισοζυγίου στην επιφάνεια του εδάφους

Σχήμα 10.4.1 Μέση ημερήσια κύμανση των συνιστωσών του ενεργειακού ισοζυγίου στην επιφάνεια του εδάφους, σε χαρακτηριστικές περιοχές του πλανήτη (Physical Climatology W.D.SELLERS)

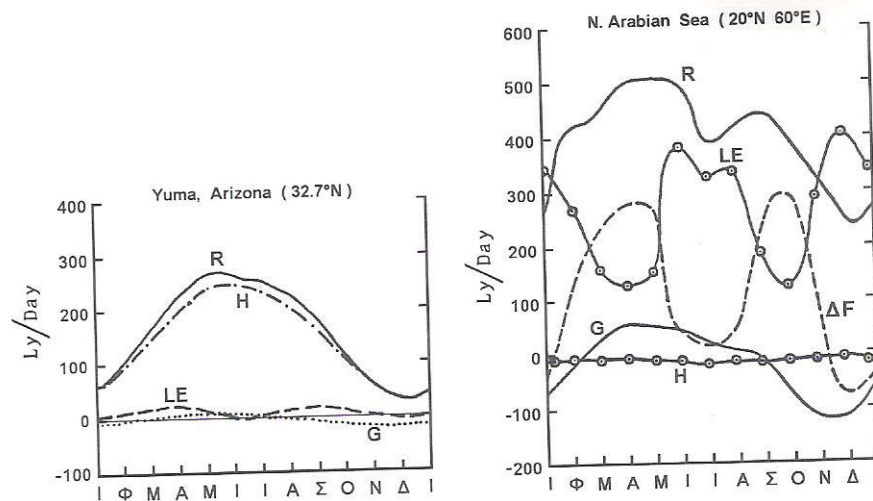


# Το ενεργειακό Ισοζύγιο στην επιφάνεια του εδάφους

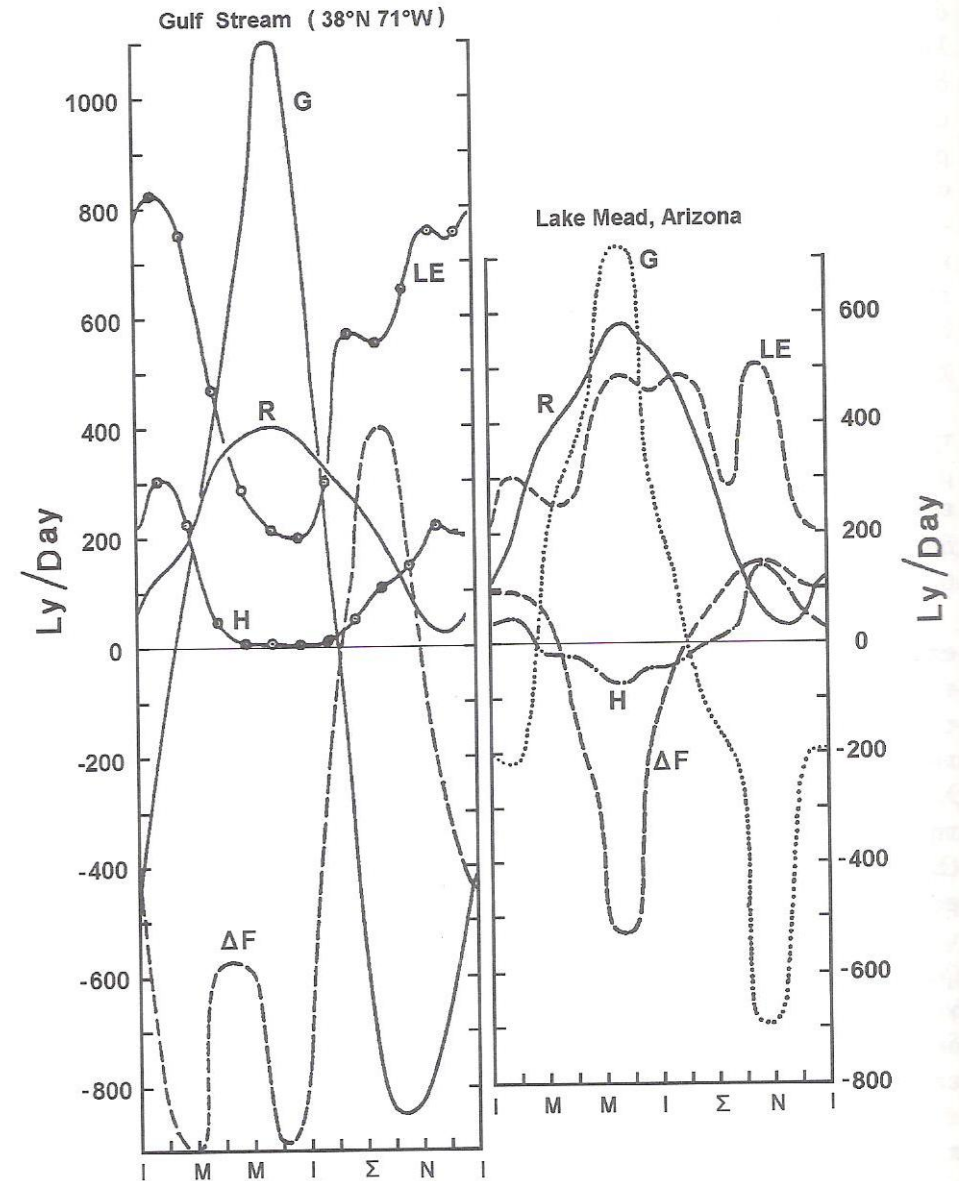
- Μέση ετήσια μεταβολή των συνιστωσών του ενεργειακού ισοζυγίου στην επιφάνεια του εδάφους σε διάφορες περιοχές του πλανήτη



Σχήμα 10.3.2 Μέση ετήσια κύμανση των συνιστωσών του ενεργειακού ισοζυγίου της επιφάνειας του εδάφους σε χαρακτηριστικές περιοχές του πλανήτη (Physical Climatology, W.D. SELLERS).



Σχήμα 10.3.3. Μέση ετήσια κύμανση των συνιστωσών του ενεργειακού ισοζυγίου της επιφάνειας του εδάφους σε χαρακτηριστικές περιοχές του πλανήτη (Physical Climatology, W. D. SELLERS).



Σχήμα 10.3.4. Μέση ετήσια κύμανση των συνιστωσών του ενεργειακού ισοζυγίου στην επιφάνεια του εδάφους, σε χαρακτηριστικές περιοχές του πλανήτη (Physical Climatology, W.D. SELLERS).

# Το ενεργειακό Ισοζύγιο στην επιφάνεια του εδάφους

Γεωγραφική κατανομή των συνιστωσών του ενεργειακού ισοζυγίου στην επιφάνεια της Γης  
τους μήνες Ιανουάριο και Ιούλιο

**Πηγή:**

[http://geog.uoregon.edu/envchange/clim\\_animations/gifs/four\\_storage\\_web.gif](http://geog.uoregon.edu/envchange/clim_animations/gifs/four_storage_web.gif)

# Το ενεργειακό Ισοζύγιο στην επιφάνεια του εδάφους

Μέση ετήσια γεωγραφική κατανομή των συνιστωσών του ενεργειακού ισοζυγίου στην επιφάνεια της Γης

**Πηγή:**

[http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng\\_textbook/chapter05/chapter05\\_06.htm](http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng_textbook/chapter05/chapter05_06.htm)

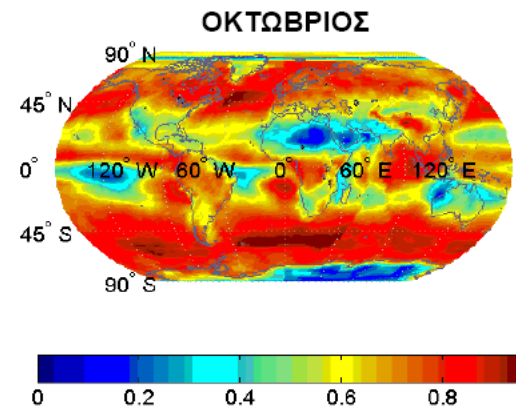
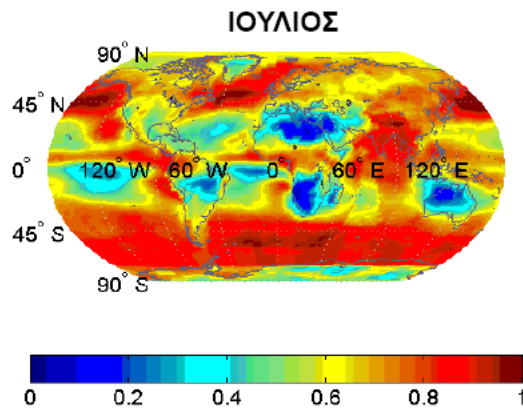
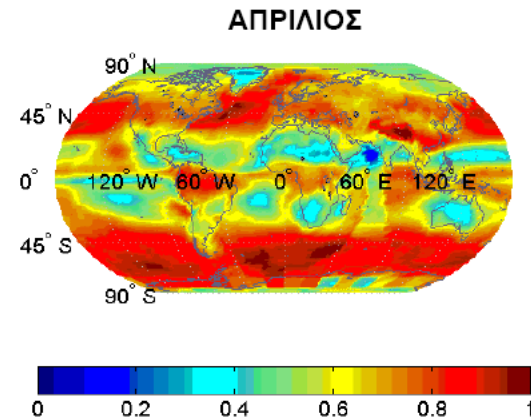
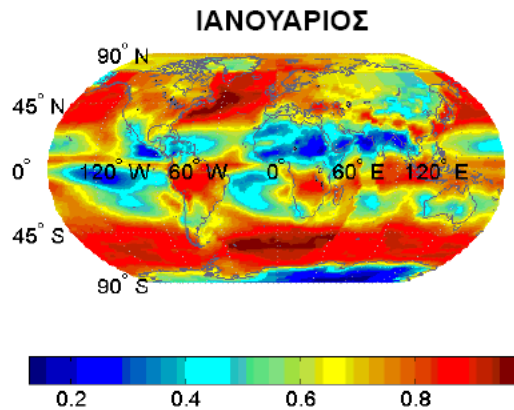
# Ο ρόλος των νεφών στο ενεργειακό Ισοζύγιο του Πλανήτη

- Τα νέφη παίζουν κυρίαρχο ρόλο-κλειδί στο ενεργειακό ισοζύγιο της Γης
- Εμπλέκονται τόσο στη ρύθμιση του ενεργειακού ισοζυγίου της ηλιακής ακτινοβολίας όσο και της υπέρυθρης μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας
- Επίσης κατά το σχηματισμό τους απελευθερώνεται λανθάνουσα θερμότητα στην ατμόσφαιρα λόγω της συμπύκνωσης των υδρατμών, ενώ κατά τη διάλυση τους (εξάτμιση υδροσταγόνων) απορροφάται λανθάνουσα θερμότητα από την ατμόσφαιρα
- Τα νέφη καλύπτουν το 50 – 60 % της ατμόσφαιρας της Γης και έχουν τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην ανακλαστικότητα (albedo) του πλανήτη =>



# Ο ρόλος των νεφών στο ενεργειακό Ισοζύγιο του Πλανήτη

## Μέση νεφοκάλυψη του Πλανήτη

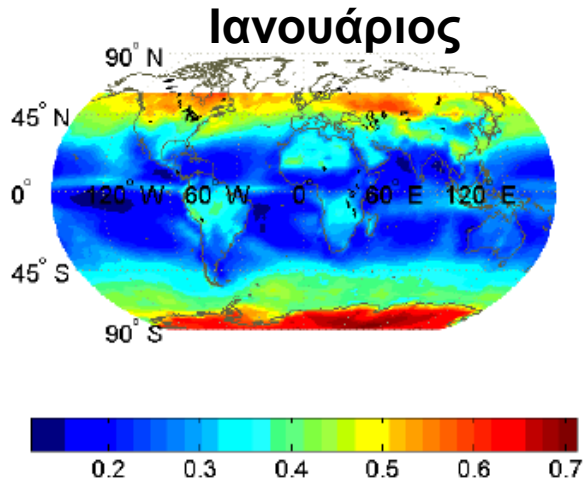


Πηγή: with the courtesy of Dr Nikos Hatzianastassiou (personal communication)

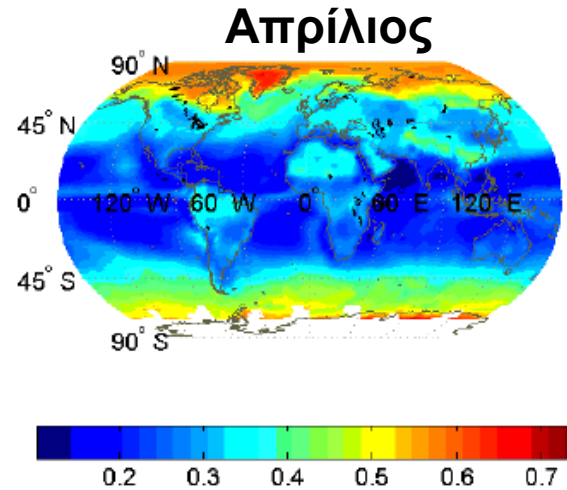


# Ο ρόλος των νεφών στο ενεργειακό Ισοζύγιο του Πλανήτη

- Γεωγραφική κατανομή της λευκαύγειας ( $R_p$ ) του πλανήτη (επιφάνεια + ατμόσφαιρα)  
– Planetary albedo

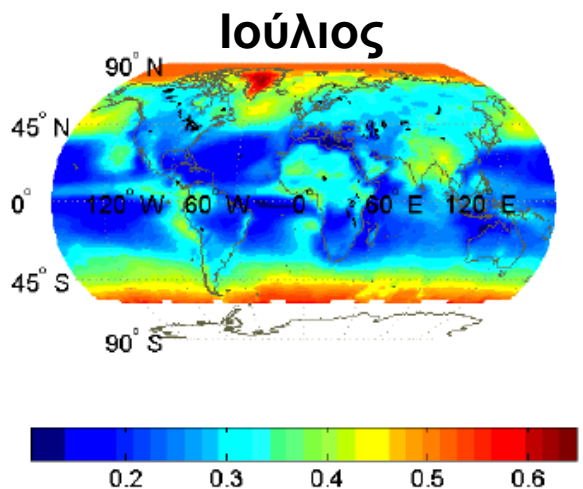


(a)

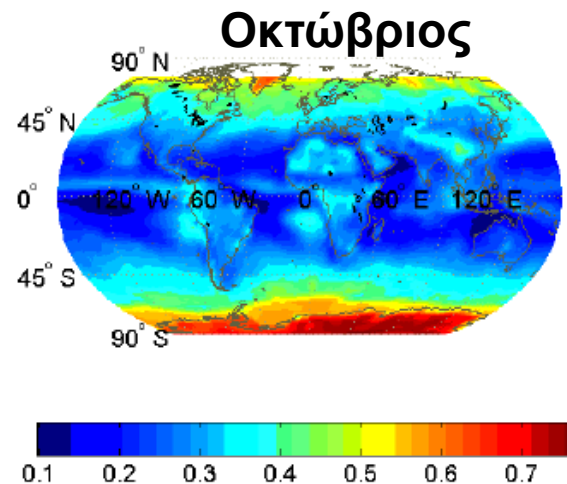


**Μέγιστες Τιμές** πάνω από:

- ✓ πόλους λόγω παγοκάλυψης
- ✓ Περιοχές μεγάλο υψόμετρο λόγω μόνιμης παγοκάλυψης & χιονοκάλυψης
- ✓ περιοχές με σημαντική νέφωση



(c)



**Ελάχιστες Τιμές** πάνω από:

- ✓ ωκεάνιες τροπικές και υποτροπικές περιοχές όπου επικρατούν συστήματα υψηλών πιέσεων

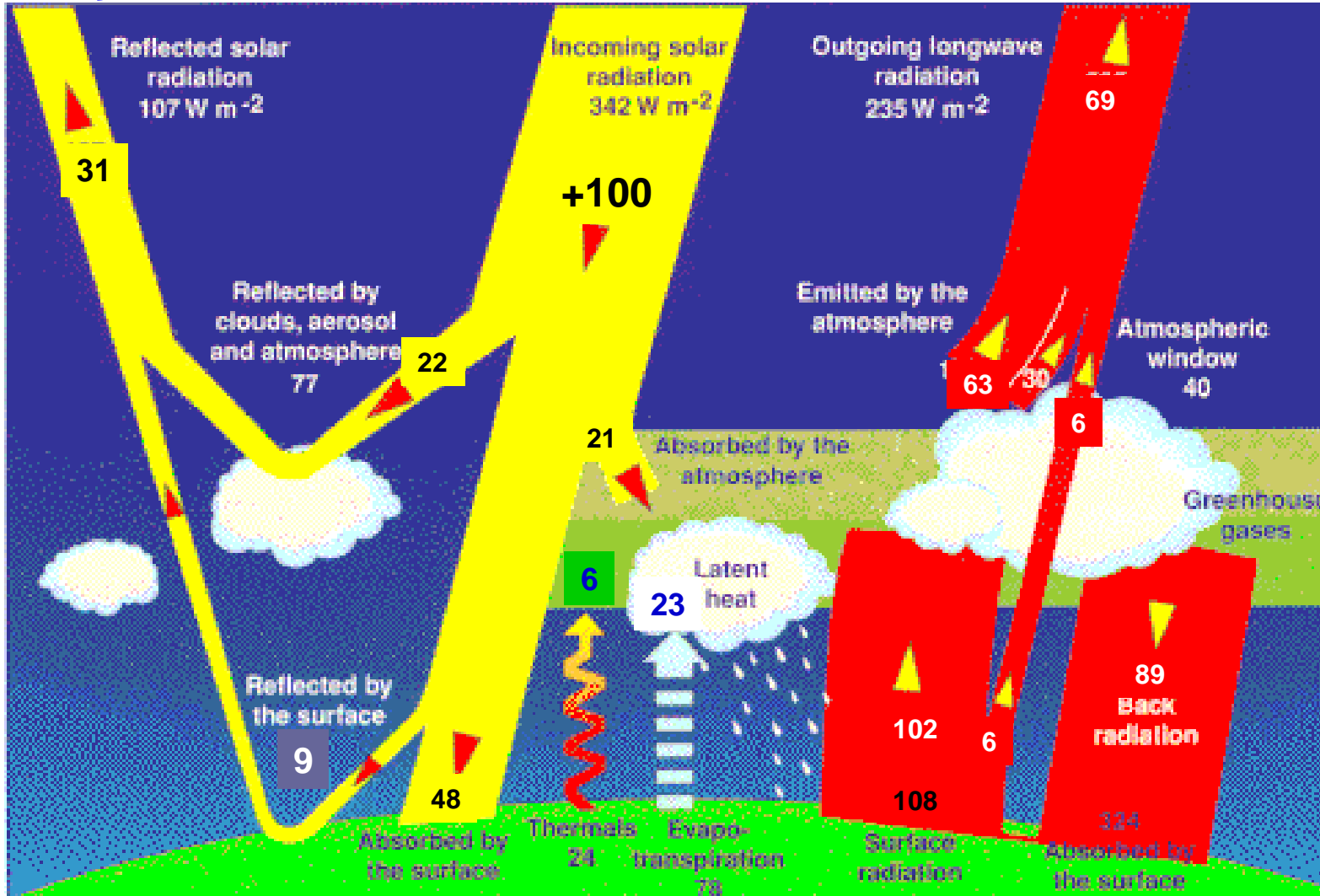
Πηγή: Hatzianastassiou, N. et al., (2004): Long-term global distribution of Earth's shortwave radiation budget at the top of atmosphere, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4, 1217-1235



# Ο ρόλος των νεφών στο ενεργειακό Ισοζύγιο του Πλανήτη

Ψύξη

Θέρμανση



Πηγή: adapted from: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/CloudsInBalance/>

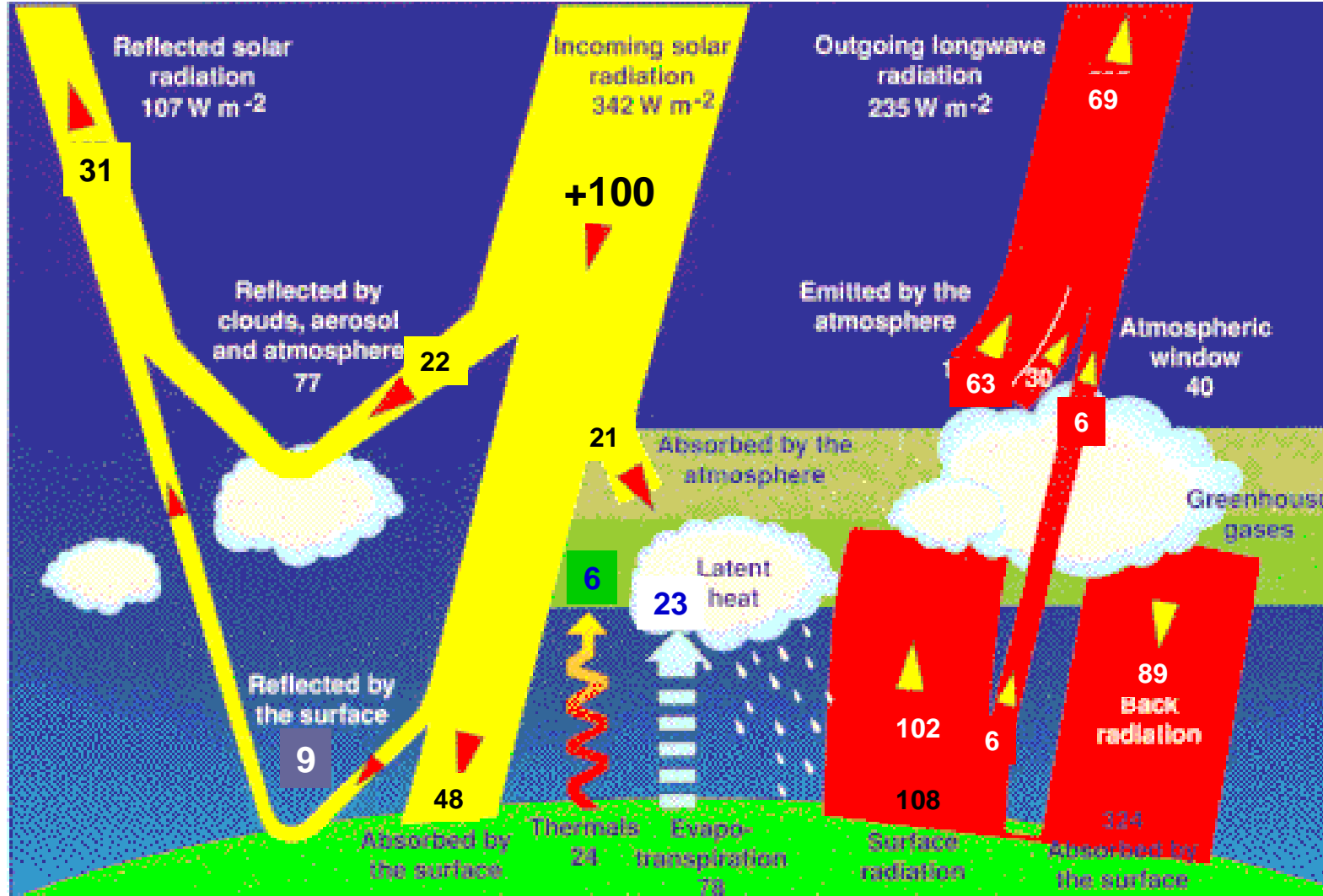
=> Λόγω της παρουσίας των νεφών μέσα στην ατμόσφαιρα σημαντικό μέρος (~22 %) της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας ανακλάται & σκεδάζεται πίσω στο διάστημα μειώνοντας την ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια => προκαλώντας **ψύξη** του πλανήτη



# Ο ρόλος των νεφών στο ενεργειακό Ισοζύγιο του Πλανήτη

Ψύξη

Θέρμανση



Πηγή: adapted from: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/CloudsInBalance/>

- Τα νέφη όμως συμμετέχουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου απορροφώντας την υπέρυθη γήινη ακτινοβολία και εκπέμποντας προς την επιφάνεια μεγάλους μήκους κύματος θερμική ακτινοβολία => προκαλώντας έτσι **θέρμανση** της επιφάνειας του πλανήτη

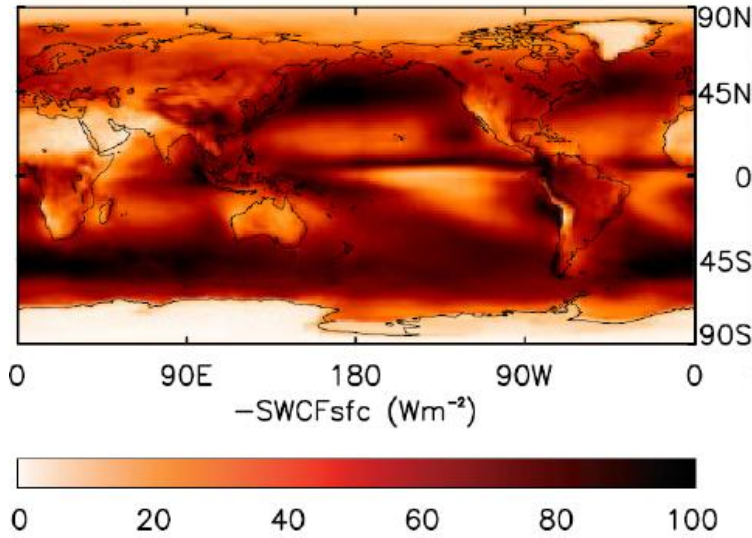




# Ο ρόλος των νεφών στο ενεργειακό Ισοζύγιο του Πλανήτη

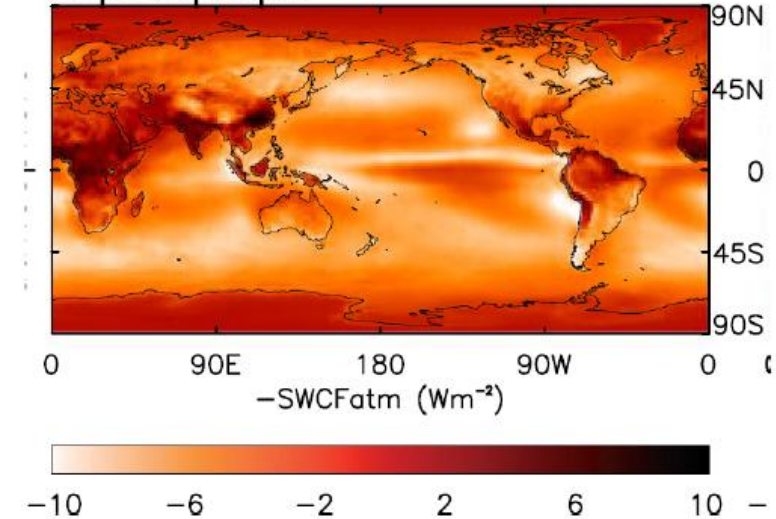
## ■ Επίδραση των νεφών στην ηλιακή ακτινοβολία

Επιφάνεια



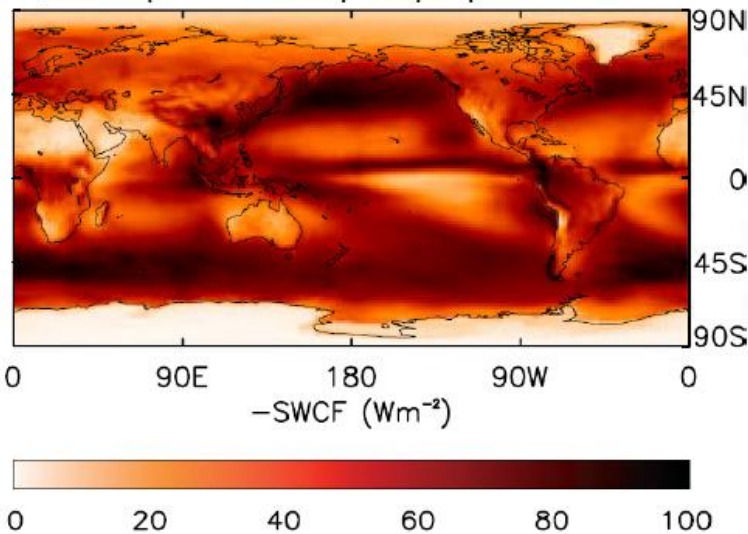
Τα νέφη μέσω της επίδρασης τους στην ηλιακή ακτινοβολία **ψύχουν** την επιφάνεια του πλανήτη. Η ψύξη σε ορισμένες περιοχές μπορεί να φτάσει τα  $100 \text{ W/m}^2$

Ατμόσφαιρα



Τα νέφη μέσω της επίδρασης τους στην ηλιακή ακτινοβολία **θερμαίνουν**, κατά μέσο όρο την ατμόσφαιρα του πλανήτη λόγω απορρόφησης της ακτινοβολίας. Η θέρμανση αυτή είναι μικρή

Κορυφή της ατμόσφαιρας → Σύνολο πλανήτη  
→ Επιφάνεια + Ατμόσφαιρα



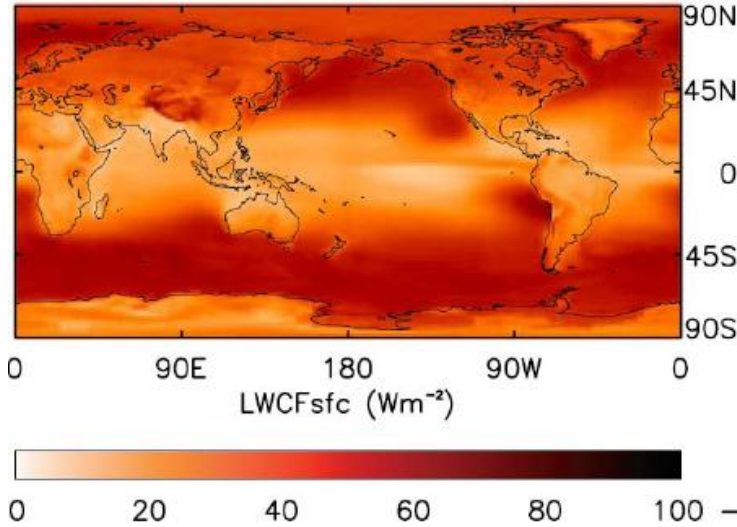
Η **συνολική** επίδραση των νεφών στο ισοζύγιο ηλιακής ακτινοβολίας του πλανήτη (επιφάνεια + ατμόσφαιρα) είναι **ψύξη**. Η ψύξη αυτή μπορεί να είναι αρκετά ισχυρή καθώς σε ορισμένες φτάνει τα  $100 \text{ W/m}^2$



# Ο ρόλος των νεφών στο ενεργειακό Ισοζύγιο του Πλανήτη

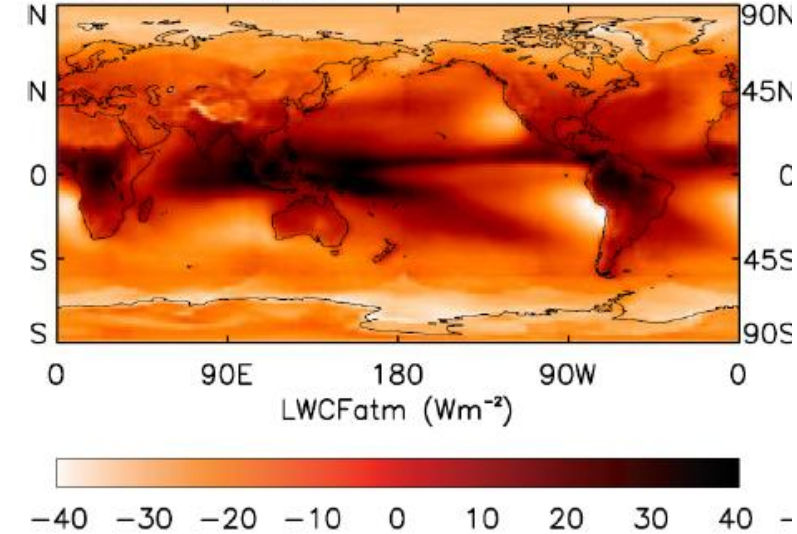
## Επίδραση των νεφών στη Γήινη (υπέρυθρη ακτινοβολία) ακτινοβολία

Επιφάνεια



Τα νέφη μέσω της επίδρασης τους στην υπέρυθρη ακτινοβολία **θερμαίνουν** την επιφάνεια του πλανήτη. Η θέρμανση σε ορισμένες περιοχές μπορεί να φτάσει τα  $100 \text{ W/m}^2$

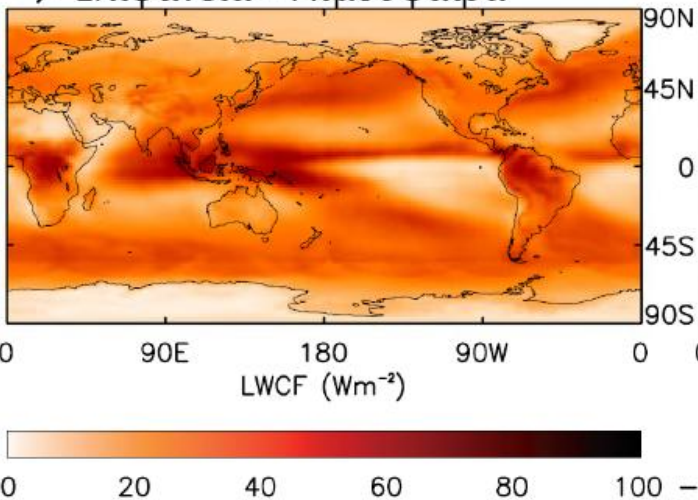
Ατμόσφαιρα



Τα νέφη μέσω της επίδρασης τους στην υπέρυθρη ακτινοβολία **ψύχουν**, κατά μέσο όρο, την ατμόσφαιρα. Παρόλα αυτά, **θερμαίνουν** την ατμόσφαιρα στους **τροπικούς** κατά μήκος της ενδοτροπικής ζώνης σύγκλισης (ITCZ) και την ψύχουν έξω από τους τροπικούς.

Η επίδραση των νεφών στην ατμόσφαιρα μέσω της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη από την επίδραση μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας

Κορυφή της ατμόσφαιρας → Σύνολο πλανι  
→ Επιφάνεια + Ατμόσφαιρα



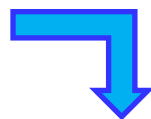
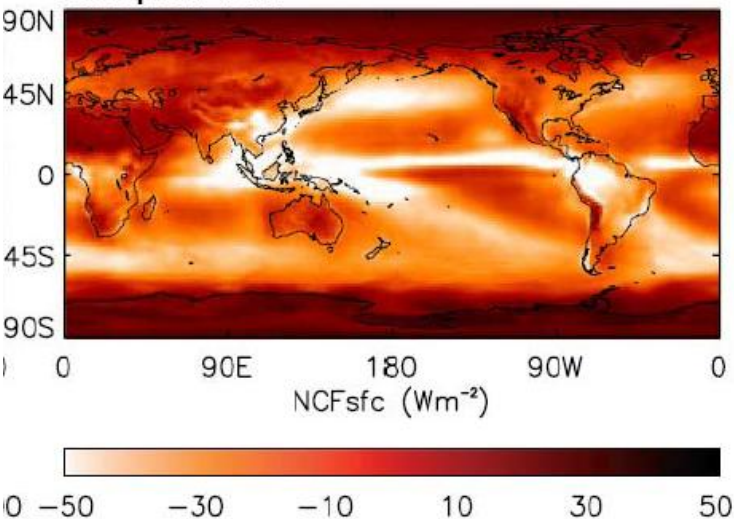
Η **συνολική** επίδραση των νεφών στην υπέρυθρη ακτινοβολία του πλανήτη (επιφάνεια + ατμόσφαιρα) είναι **θέρμανση**. Η θέρμανση αυτή είναι σαφώς μικρότερη από τη ψύξη που προκαλείται από την επίδραση στην ηλιακή ακτινοβολία



# Ο ρόλος των νεφών στο ενεργειακό Ισοζύγιο του Πλανήτη

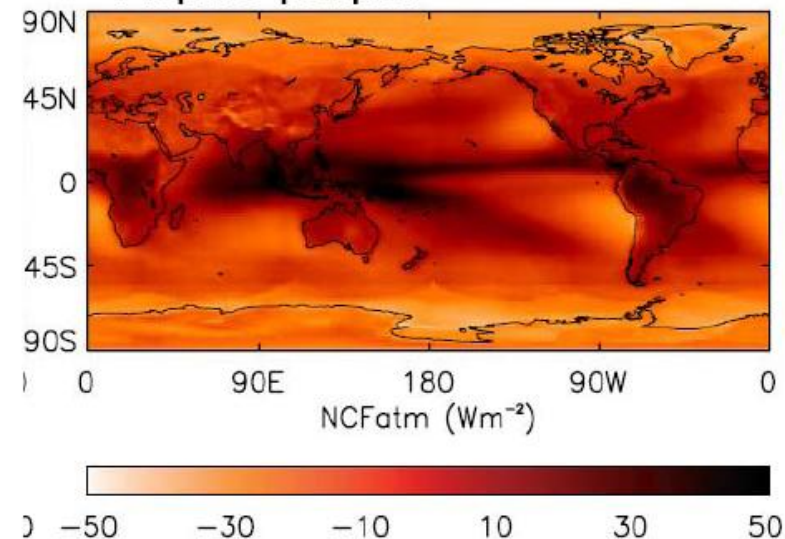
- Καθαρή επίδραση των νεφών στο ισοζύγιο ακτινοβολίας (ηλιακή & υπέρυθη)

Επιφάνεια



Συνολικά, κατά μέσο όρο, τα νέφη μέσω της επίδρασης τους στο ισοζύγιο ακτινοβολιών (ηλιακή & Υπέρυθη ακτινοβολία) **ψύχουν** την επιφάνεια του πλανήτη

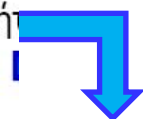
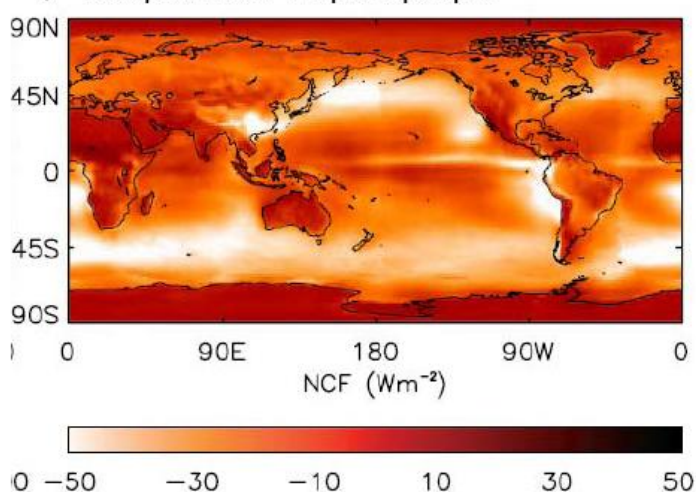
Ατμόσφαιρα



Η **συνολική επίδραση** των νεφών στην **ατμόσφαιρα** είναι **ψύξη**.

**Προσοχή:** πάνω από τις **τροπικές περιοχές** όμως προκαλούν **θέρμανση** ενώ έξω από τους τροπικούς προκαλούν ψύξη ενισχύοντας έτσι τη μεσημβρινή θερμοβαθμίδα και επομένως τη μεσημβρινή κυκλοφορία που προκαλεί τη μεταφορά ενέργειας από τους τροπικούς στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη

Κορυφή της ατμόσφαιρας → Σύνολο πλανήτη  
→ Επιφάνεια + Ατμόσφαιρα



Η **συνολική επίδραση** των νεφών στο ισοζύγιο ακτινοβολίας (ηλιακή & υπέρυθη) του **πλανήτη** (επιφάνεια + ατμόσφαιρα) είναι **ψύξη**. Βέβαια, υπάρχουν περιοχές όπου κυριαρχεί η επίδραση στην υπέρυθη και επομένως η θέρμανση. Όμως συνολικά η μέση πλανητική επίδραση είναι **ψύξη**



# Ο ρόλος των νεφών στο ενεργειακό Ισοζύγιο του Πλανήτη

- Καθαρή επίδραση των νεφών στο ισοζύγιο ακτινοβολίας (ηλιακή & υπέρυθρη)
- **Επιφάνεια:** κυριαρχεί η επίδραση των νεφών στην ηλιακή ακτινοβολία δηλ. η **ψύξη**
- **Ατμόσφαιρα:** κυριαρχεί η επίδραση των νεφών στην υπέρυθρη ακτινοβολία με αποτέλεσμα αυτά να προκαλούν **θέρμανση** πάνω από τα **μικρά γεωγραφικά πλάτη** (τροπικούς) και **ψύξη** στα **μεσαία και μεγάλα γεωγραφικά πλάτη**
- **Κορυφή της ατμόσφαιρας** → **Σύνολο πλανήτη** → **Επιφάνεια + Ατμόσφαιρα:** η συνολική επίδραση (μέση πλανητική τιμή) των νεφών στο ισοζύγιο του πλανήτη είναι **ψύξη** δηλ. κυριαρχεί η επίδραση στην ηλιακή ακτινοβολία. Βέβαια σε ορισμένες περιοχές μπορεί να κυριαρχεί η επίδραση στην υπέρυθρη ακτινοβολία (θέρμανση)

▪ **Σημείωση:** μικρή αλλαγή στο ποσοστό της νεφοκάλυψης ή/και στις ιδιότητες των νεφών (π.χ. γεωμετρικό πάχος, οπτικές ιδιότητες) μπορούν να αντισταθμίσουν τη θέρμανση που οφείλεται στην αύξηση της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου!



## Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την 1<sup>η</sup> έκδοση.

## Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, Αγγελική Φωτιάδη, 2015.

Αγγελική Φωτιάδη. «ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ - ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ». Έκδοση: 1.0. Αγρίνιο 2015.

Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:

[https://eclass.upatras.gr/modules/document/document.php?course=ENV\\_127](https://eclass.upatras.gr/modules/document/document.php?course=ENV_127)

## Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά Δημιουργού, Απαγόρευση Εμπορικής Χρήσης και Όχι Παράγωγα Έργα. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».

**« Το υλικό της παρουσίασης προέρχεται από τις πανεπιστημιακές παραδόσεις της καθηγήτριας Α. Φωτιάδη».**



**Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:**

**Διαφάνεια 5: Πηγή:** <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bb/The-NASA-Earth's-Energy-Budget-Poster-Radiant-Energy-System-satellite-infrared-radiation-fluxes.jpg>

**Διαφάνεια 6: Πηγή:** [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar\\_Spectrum\\_fr.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_Spectrum_fr.jpg)

**Πηγή:** <http://www.ces.fau.edu/nasa/module-2/radiation-sun.php>

**Διαφάνεια 7:** <https://en.wikipedia.org/wiki/Sunlight>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Light>

**Διαφάνεια 8: Πηγή:** **adapted from** [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7c/Atmospheric\\_Transmission.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7c/Atmospheric_Transmission.png)

**Διαφάνεια 9: Πηγή:** [https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared\\_window](https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared_window)

**Διαφάνεια 10:** [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/28/Inverse\\_square\\_law.svg/2000px-Inverse\\_square\\_law.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/28/Inverse_square_law.svg/2000px-Inverse_square_law.svg.png)

with the courtesy of E. Kodouli

**Διαφάνεια 13: Πηγή:** <http://www.grida.no/publications/vg/africa/page/3110.aspx>

**Διαφάνεια 14: Πηγή:** [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d5/The\\_green\\_house\\_effect.svg/2000px-The\\_green\\_house\\_effect.svg.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d5/The_green_house_effect.svg/2000px-The_green_house_effect.svg.png)

with the courtesy of E. Kodouli

**Διαφάνεια 19 - 20: Πηγή:** [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmospheric\\_Transmission.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmospheric_Transmission.png)



**Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:**

**Διαφάνεια 21:** [https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared\\_window](https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared_window)

**Διαφάνεια 22 - 23:** [http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Atmospheric\\_Absorption\\_Bands\\_png](http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Atmospheric_Absorption_Bands_png)

**Διαφάνεια 25:** [https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared\\_window](https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared_window)

**Διαφάνεια 27:**

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth%27s\\_greenhouse\\_effect\\_%28US\\_EPA,\\_2012%29.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth%27s_greenhouse_effect_%28US_EPA,_2012%29.png)

**Διαφάνεια 28:** <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/CloudsInBalance/>

**Διαφάνεια 33:** <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bb/The-NASA-Earth's-Energy-Budget-Poster-Radiant-Energy-System-satellite-infrared-radiation-fluxes.jpg>

**Διαφάνεια 35:** Σαχσαμάνογλου Χ.Σ. και Α.Α. Μπλούτσος, Φυσική κλιματολογία, 1998

**Διαφάνεια 36 - 38: Πηγή:** Σαχσαμάνογλου Χ.Σ. και Α.Α. Μπλούτσος, Φυσική κλιματολογία, 1998

**Διαφάνεια 41-42:** Σαχσαμάνογλου Χ.Σ. και Α.Α. Μπλούτσος, Φυσική κλιματολογία, 1998

**Διαφάνεια 46: Πηγή:** with the courtesy of Dr Nikos Hatzianastassiou (personal communication)

**Διαφάνεια: Πηγή:** Hatzianastassiou, N. et al., (2004): Long-term global distribution of Earth's shortwave radiation budget at the top of atmosphere, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4, 1217-1235

**Διαφάνεια 48 – 49: Πηγή: adapted from:** <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/CloudsInBalance/>

**Διαφάνεια 50 - 52:** R.P. Allan, Combining satellite data and models to estimate cloud radiative effect at the surface and in the atmosphere, *Meteorological Applications*, 18 (2011), pp. 324–333, doi: 10.1002/met.285

