



Φυσική Περιβάλλοντος :

“Κεφ 2, Ηλιακή Ακτινοβολία 1ο”

*Καθ. Μιχάλης Γρ Βραχόπουλος
Επ Καθ Δημήτρης Λαδάκης*

Energy and Environmental Research Laboratory



Η ενέργεια που δέχεται η ατμόσφαιρα μπορεί προέρχεται από
τρεις πηγές:

τον ήλιο,

τα υπόλοιπα άστρα και την κοσμική ακτινοβολία

και

από το εσωτερικό της Γης.

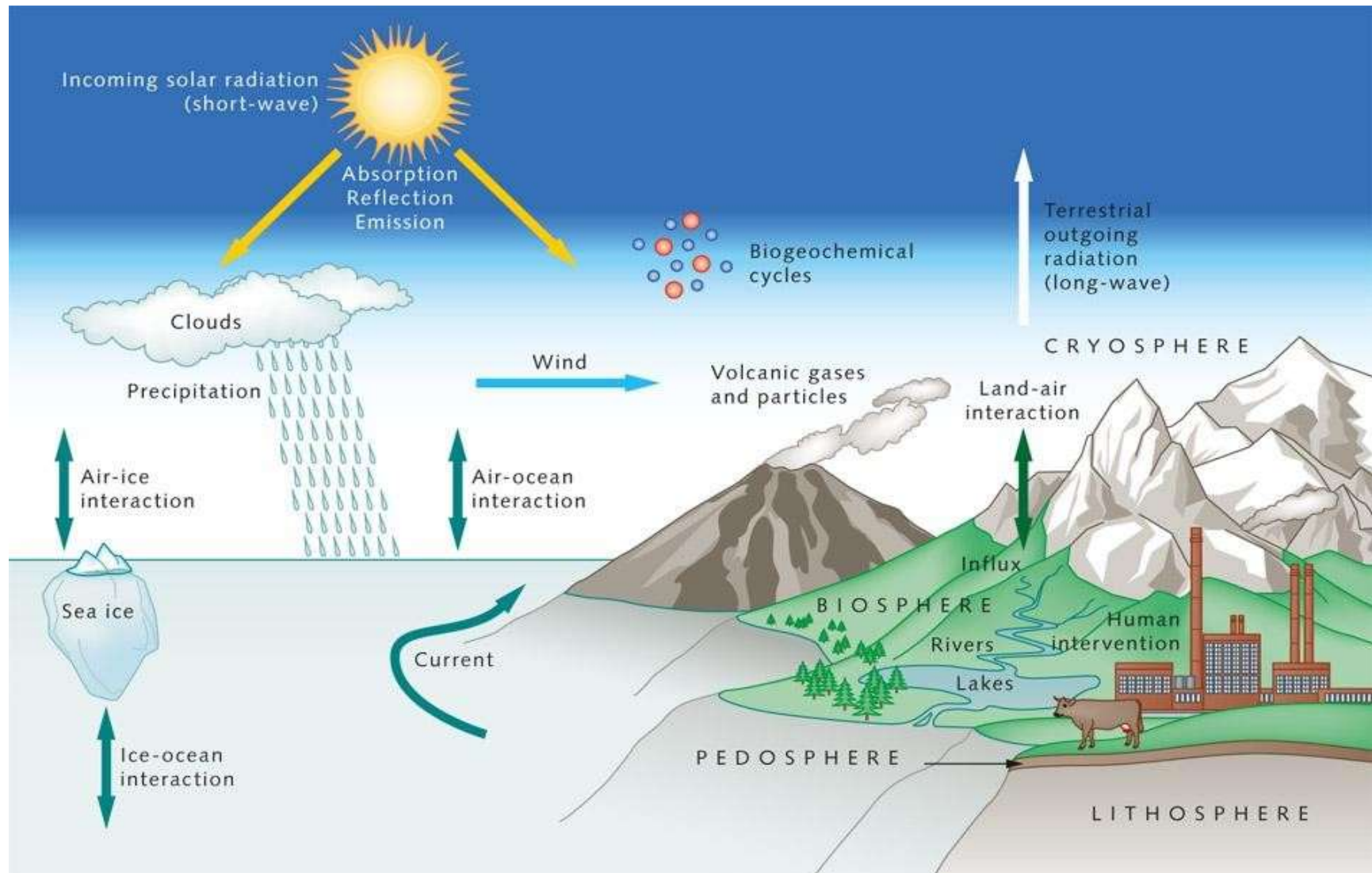
Το εσωτερικό της γης βρίσκεται σε ρευστή κατάσταση, παρόλα αυτά δεν μεταφέρεται σημαντική ποσότητα θερμότητας στην επιφάνεια, περί τα 30W/m^2 , παρά μόνο μέσω των ακανόνιστων και σπάνιων, πλέον, εκρήξεων των ηφαιστειών.

Σε βάθος χρόνου μπορεί η ενέργεια αυτή να θεωρηθεί αμελητέα.

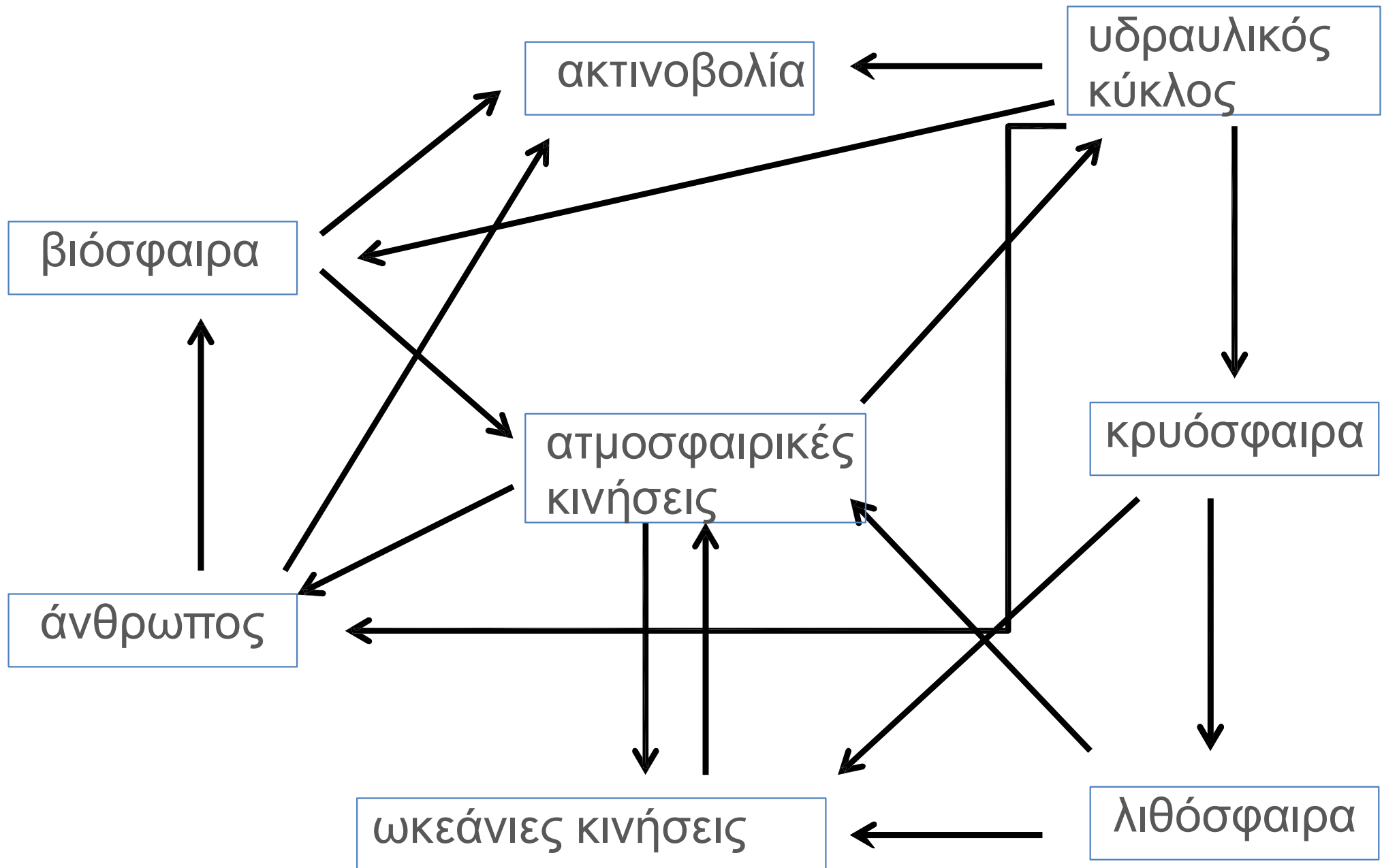
Η μεταφορά ενέργειας μέσω της κοσμικής ακτινοβολίας επίσης μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

Συνεπώς: ο Ήλιος αποτελεί ουσιαστικά την μόνη σημαντική πηγή ενέργειας για την ατμόσφαιρα της Γης

«Λειτουργικά μέρη» του κλιματικού συστήματος.. και ήλιος

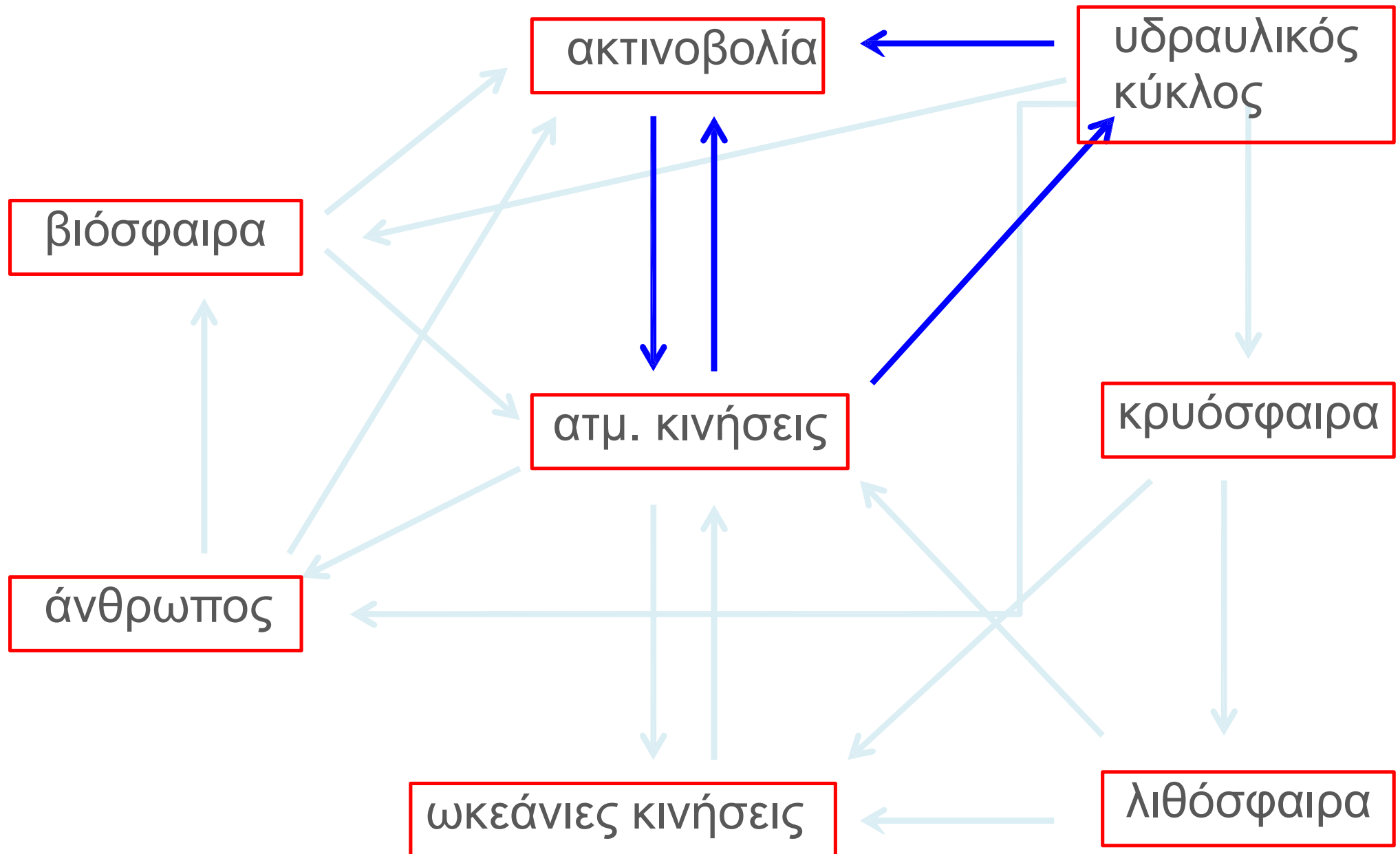


... Δημιουργούν ένα πολύπλοκο σύστημα

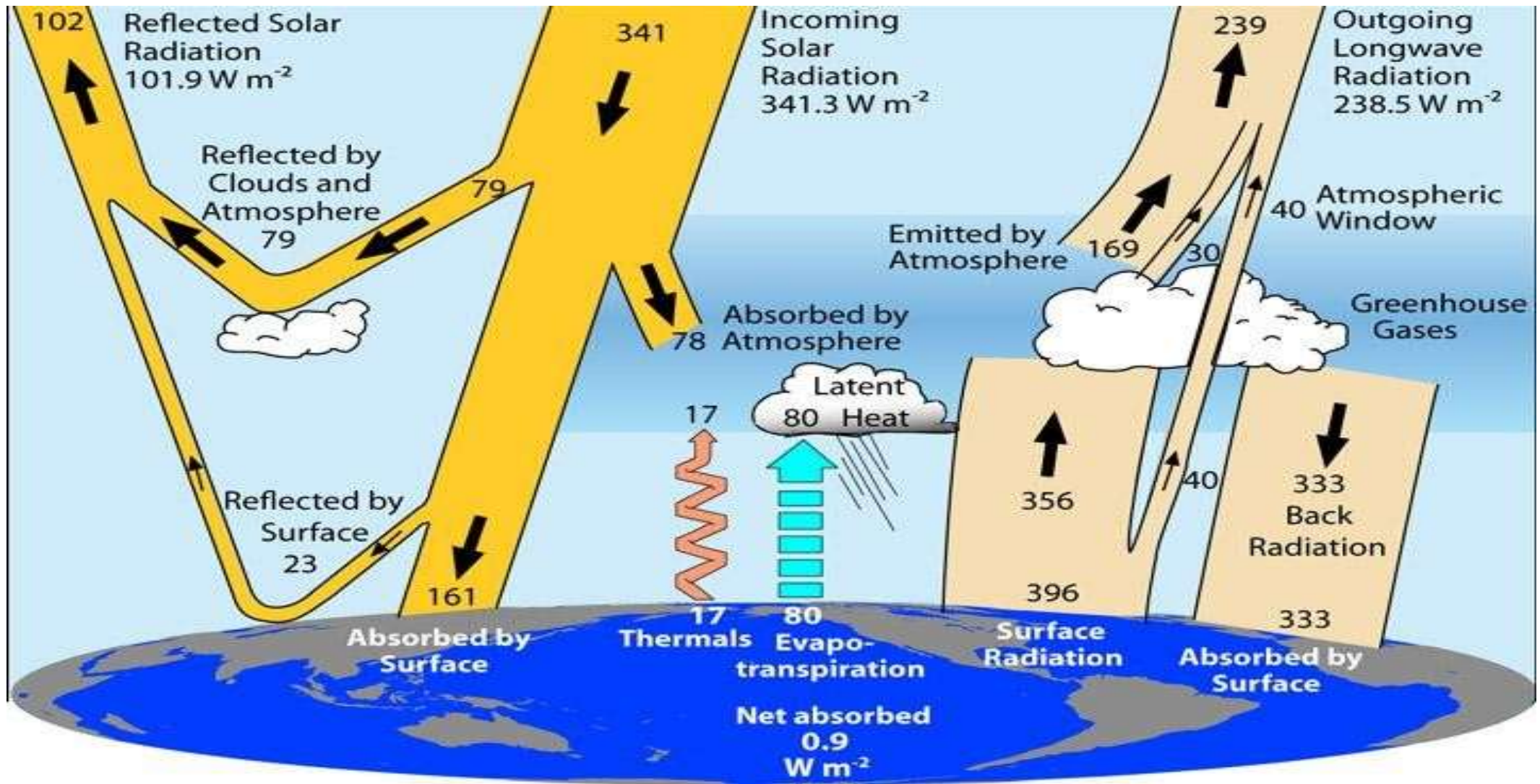


.... Με προσεγγίσεις και απλοποιήσεις ...

το πολύπλοκο σύστημα απλοποιήθηκε



Η πηγή της ενέργειας



Πώς διαδίδεται η ακτινοβολία και τί επιπτώσεις έχει (π.χ. T)

Εργαλεία: Νόμος Planck, εξίσωση Schwarzschild

Τα πρώτα (κάποια) ερωτήματα ?

- Πόση ακτινοβολία εκπέμπει ο Ήλιος ;
- Πόση ακτινοβολία φτάνει στη Γή ;
- Πόση ακτινοβολία φτάνει σε κάθε τόπο (... & χρόνο) ;
- Πώς διαδίδεται η ακτινοβολία μέσα στην ατμόσφαιρα ;

Ο Ήλιος, αποτελείται από στρώματα:

το εσωτερικό του, από το οποίο τα εκπεμπόμενα φωτόνια (δεν φτάνουν μέχρι τη Γη). Όπου αναπτύσσονται υπερβολικά υψηλές θερμοκρασίες (μερικά εκατομμύρια βαθμοί, $\sim 13,6 \cdot 10^6$) και την «ατμόσφαιρά» του, που διακρίνεται σε τρεις περιοχές – **τη φωτόσφαιρα, τη χρωμόσφαιρα και το στέμμα.**

Ανάμεσα στην χρωμόσφαιρα και στο στέμμα, υπάρχει μια μεταβατική περιοχή.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που φτάνει στη Γη από τον Ήλιο, ονομάζεται **ηλιακή ακτινοβολία**, προέρχεται κυρίως από τη φωτόσφαιρα επειδή τα άλλα στρώματα ακτινοβολούν πολύ λίγο.

Η ηλιακή ακτινοβολία, που αποτελείται από φωτόνια, διανύει την απόσταση Ήλιος-Γη σε 8min περίπου.

Η μέση ετήσια τιμή της στο όριο της ατμόσφαιρας είναι ίση με ~1368W/m² περίπου και αποκαλείται **ηλιακή σταθερά**.

Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη Γη, αποτελείται από όλα τα μήκη κύματος

(ορατό, υπεριώδες, υπέρυθρο, μικροκύματα, ραδιοκύματα, βραχέα) αλλά και ακτίνες X και γ

➤ Ο **Ήλιος** αποτελεί την **πιο σημαντική** & στην ουσία τη **μοναδική πηγή ενέργειας** του πλανήτη. Ένα ποσοστό αυτής της ενέργειας, μετασχηματίζεται σε κινητική και δυναμική ενέργεια, δηλαδή παράγεται έργο.

➤ Η ηλιακή ενέργεια που φτάνει στη Γη αντιπροσωπεύει το **99.97 %** των αναγκών της

➤ Παρόλα αυτά η **ατμόσφαιρα** θερμαίνεται έμμεσα από την επιφάνεια της Γης παρά άμεσα από τον Ήλιο καθώς απορροφά μόλις το **21%** της εισερχόμενης ακτινοβολίας

➤ Διαμορφώνει το **κλίμα** της Γης

➤ Είναι υπεύθυνη για τη **Γενική Κυκλοφορία της Ατμόσφαιρας**

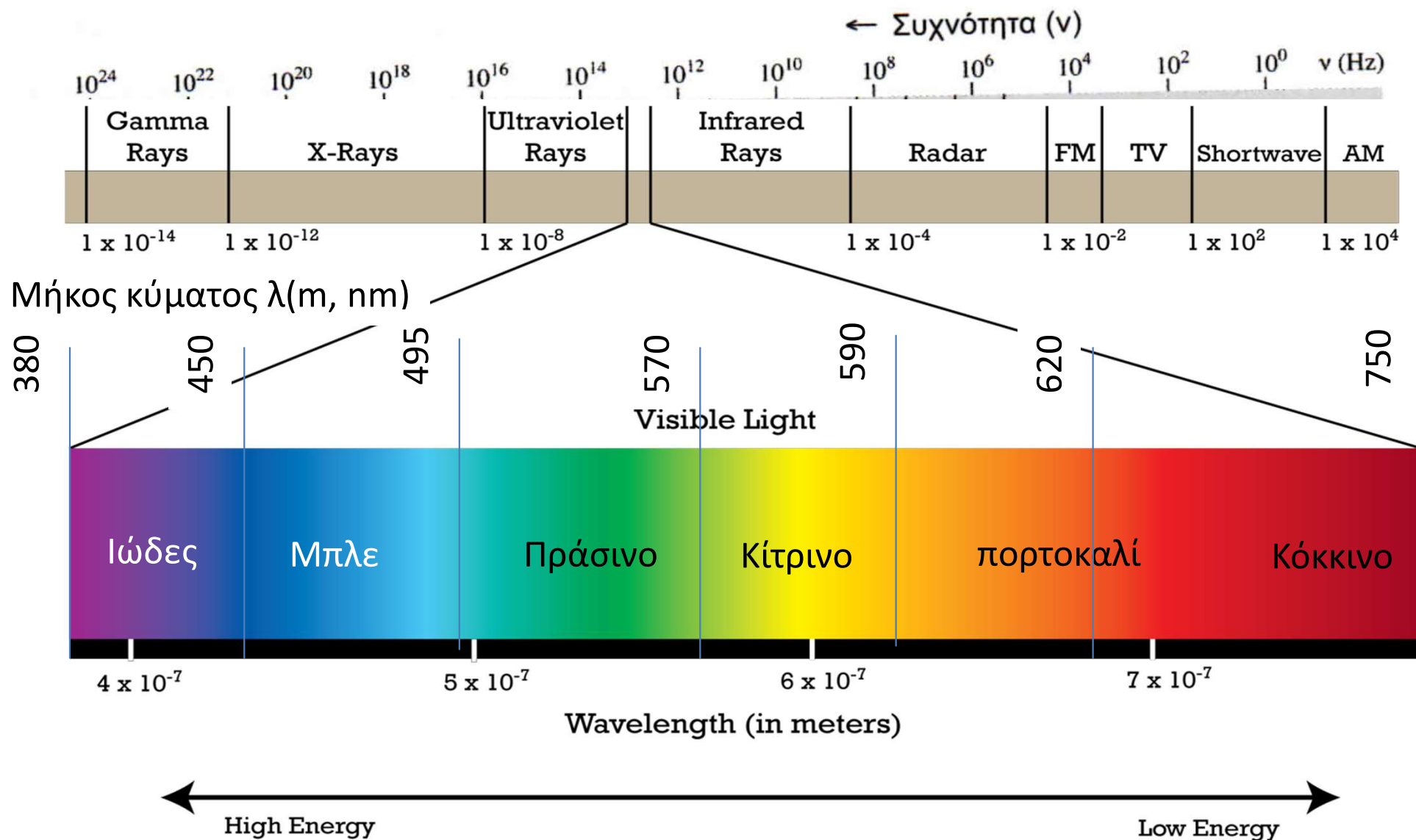
➤ Δημιουργεί **οπτικά φαινόμενα** (γαλάζιο χρώμα του ουρανού, άλως, ...)

➤ **Εξατμίζει** μεγάλες μάζες νερού

➤ Τα **φυτά** αφομοιώνουν το **3%** αυτής μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης

➡ Η ακριβής μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι σημαντική για:

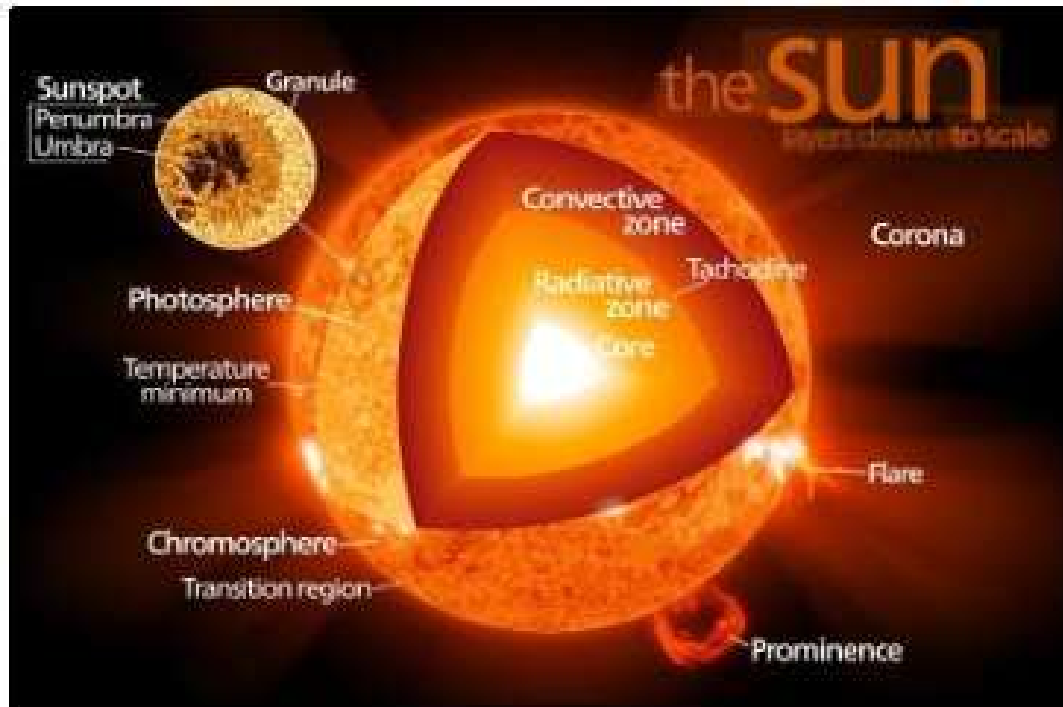
- ✓ Κλιματολογία (κλιματικά μοντέλα)
- ✓ Μετεωρολογία
- ✓ Φυσική Περιβάλλοντος
- ✓ Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
- ✓ Οικολογία



- Πόση ακτινοβολία εκπέμπει ο Ήλιος ;

Ηλιακή ακτινοβολία

Η/Μ ακτινοβολία (φως)



Πηγή: <https://en.wikipedia.org/?title=Sun>

Ο Ήλιος είναι ένα από τα 10^{11} αστέρια του γαλαξία μας & ο πλησιέστερος σε εμάς αστέρας

Ο Ήλιος παρουσιάζει ανομοιογενή κατανομή θερμοκρασίας με πολύ διαφορετικές θερμοκρασίες στα διάφορα στρώματά του (από -16×10^6 βαθμούς στον πυρήνα του, έως μερικές χιλιάδες ή εκατομμύρια βαθμούς στο εξωτερικό του, φωτόσφαιρα και στέμμα, αντίστοιχα)

Η θερμοκρασία του Ήλιου στην επιφάνεια του (φωτόσφαιρα) είναι περίπου 5800 K

Ηλιακή ακτινοβολία: προέρχεται κυρίως από τη **φωτόσφαιρα**

Η ενέργεια του Ήλιου εκπέμπεται και διαδίδεται στο χώρο με τη μορφή **ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας**

Στην ατμόσφαιρα η ακτινοβολία χωρίζεται σε δύο περιοχές:

- **Την μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία, εκπέμπεται από τον Ήλιο και αποτελείται από:**
το υπεριώδες, το ορατό και το εγγύς υπέρυθρο μέρος του φάσματος.... Μήκη κύματος μεταξύ 0,1 και 4μm.
- **Την μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία, εκπέμπεται από την επιφάνεια της Γης και αποτελείται κυρίως από το θερμικό και το μακρινό υπέρυθρο μέρος του φάσματος, Μήκη κύματος μεταξύ 4 και 100μm.**

Αυτές οι δύο περιοχές μηκών κύματος παριστάνουν φασματικές περιοχές εκπομπών μέλανος σώματος

– περίπου 5800K – (θερμοκρασία αντιπροσωπευτική της Ηλιακής ατμόσφαιρας)

ΚΑΙ

– περίπου 288K - (θερμοκρασία αντιπροσωπευτική της Γήινης ατμόσφαιρας).

Η Γήινη ακτινοβολία οφείλεται στο ότι η Γη λειτουργεί ως ένα μέλαν σώμα σε θερμοκρασία 288K.

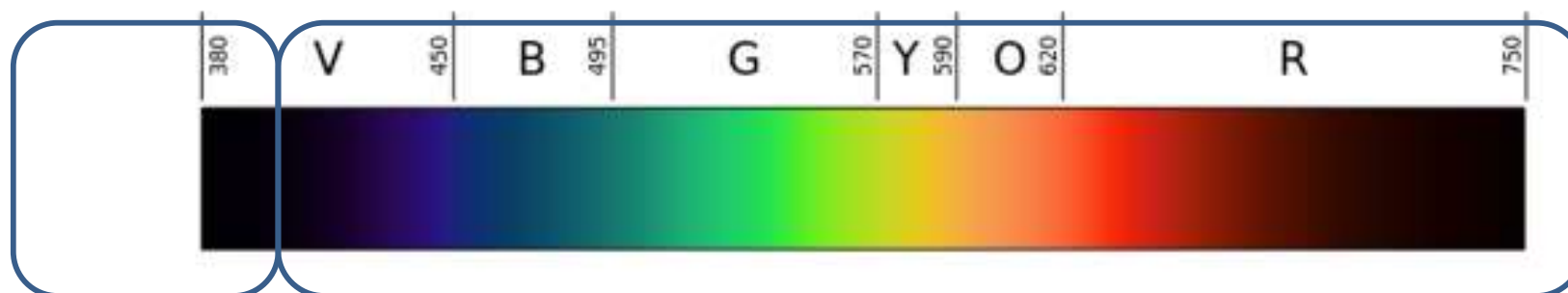
Το 99% της ακτινοβολίας που φτάνει στη Γη απ' τον Ήλιο είναι μικρού μήκους κύματος, παρόλο που εκπέμπει όλα τα μήκη κύματος.

Αντίστοιχα

Το 99% της ακτινοβολίας που εκπέμπει η Γη είναι μεγάλου μήκους κύματος.

Η Γη δεν «παράγει» (πολύ λίγη) αλλά κυρίως ανακλά και επανεκπέμπει ακτινοβολία.

Απορροφά την ημέρα και ανακλά
και επανεκπέμπει την Νύχτα



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

Φασματική Κατανομή της Ηλιακής ακτινοβολίας

Υπεριώδες ($< 0.40 \mu\text{m}$)	8.03 %
Ορατό ($0.40 - 0.77 \mu\text{m}$)	46.41 %
Υπέρυθρο ($> 0.77 \mu\text{m}$)	46.40 %

- Μας ενδιαφέρει η περιοχή του φάσματος:

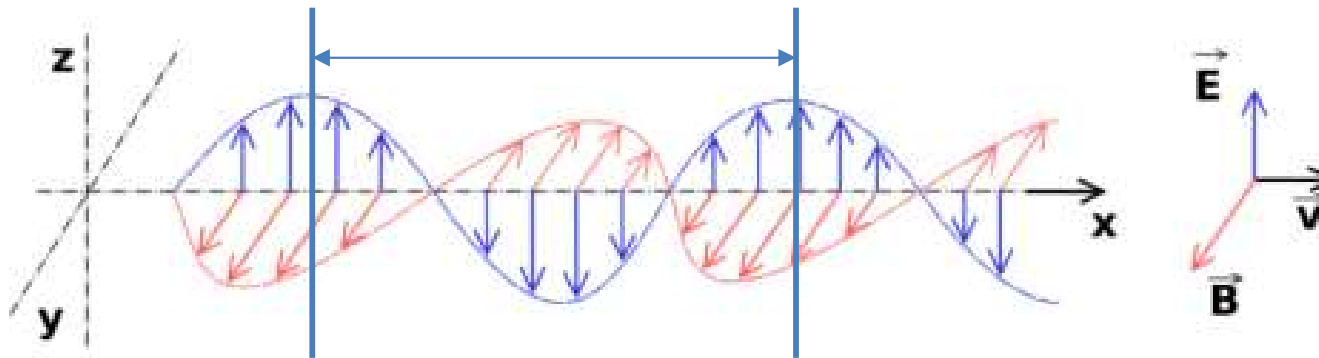
0.29 – 14 μm

(υπεριώδες – υπέρυθρο)

Γιατί μόνο αυτή η περιοχή φτάνει στην επιφάνεια της Γης

- Η ηλιακή ακτινοβολία είναι **ηλεκτρομαγνητικό κύμα**

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται στο χώρο και μεταφέρουν ηλεκτρική και μαγνητική ενέργεια με την ταχύτητα του φωτός



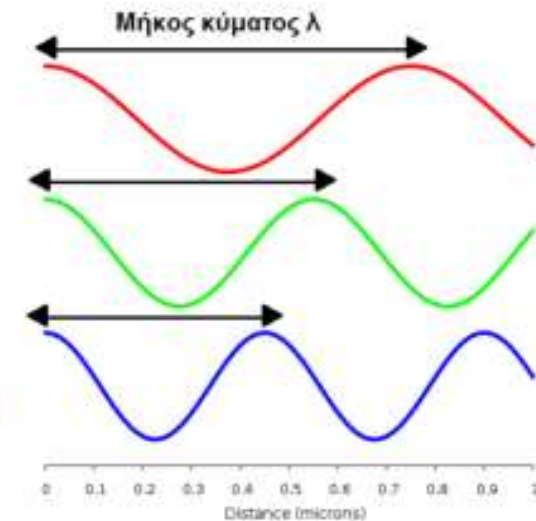
Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_radiation

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα χαρακτηρίζονται από:

- μήκος κύματος (λ)
- συχνότητα (ν)
- ταχύτητα (c)

*Υπενθυμίζεται πως στο κενό η ταχύτητα είναι γνωστή ως ταχύτητα του φωτός και ισούται με: **$C_0 = 300.000 \text{ km / sec}$**

Πηγή: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e2/VisibleEmrWavelengths.svg>



Μήκος κύματος (λ): η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ή κοιλάδων ενός κύματος

Μονάδες μέτρησης: m, cm, mm, μm , nm

$$1 \text{ cm} = 0.01 \text{ m} = 10^{-2} \text{ m}$$

$$1 \text{ mm} = 0.001 \text{ m} = 10^{-3} \text{ m}$$

$$1 \mu\text{m} = 0.000001 \text{ m} = 10^{-6} \text{ m}$$

$$1 \text{ nm} = 0.000000001 \text{ m} = 10^{-9} \text{ m}$$

Συχνότητα (ν): ο αριθμός των κορυφών ή κοιλάδων (N) που διέρχονται σε χρονικό διάστημα (t) από ένα σταθερό σημείο:

$$\nu = N / t$$

Μονάδες μέτρησης: Hz = 1 / sec

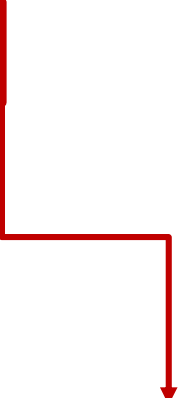
Περίοδος (T): ο χρόνος που χρειάζεται για να διαδοθεί το κύμα σε απόσταση ίση με ένα μήκος

$$T = 1 / \nu$$

Μονάδες μέτρησης: sec

Ταξινόμηση Μήκους Κύματος

Τύπος Ακτινοβολίας	Μήκος Κύματος (μm)
Γάμμα	<0.0001
Ακτίνες Χ	0.0001 ως 0.01
Υπεριώδης	0.01 ως 0.4
Ορατή	0.4 ως 0.7
Κοντινό Υπέρυθρο	0.7 ως 4.0
Θερμικό Υπέρυθρο	4 ως 100
Μικροκύματα	100 ως 1.000.000 (1m)
Ραδιοκύματα	> 1.000.000 (1 m)



Χρώμα	Περιοχή Μήκους Κύματος(nm)	Τυπικό μήκος κύματος(nm)
Ιώδες	390-455	430
Βαθύ μπλε	455-495	470
Ανοικτό μπλε	485-505	495
Πράσινο	505-575	530
Κιτρινοπράσινο	550-575	560
Κίτρινο	575-585	580
Πορτοκαλί	585-620	600
Κόκκινο	620-760	640

□ Κατανομή της ενέργειας στο ηλιακό φάσμα

Φασματική περιοχή	Μήκος κύματος	Ένταση
Υπεριώδης	150 nm – 400 nm	0.183 ly/min
I	150 – 280	0.011
II	280 – 320	0.035
III	320 - 400	0.137
Ορατή	400 nm – 740 nm	0.865 ly/min
I	400 – 520	0.343
II	520 – 620	0.259
III	620 - 740	0.263
Υπέρυθρη	740 nm – 4000 nm	0.922 ly/min
I	740 – 1400	0.658
II	1400 – 3000	0.241
III	3000 - 4000	0.022

9 % της ολικής έντασης

44 % της ολικής έντασης

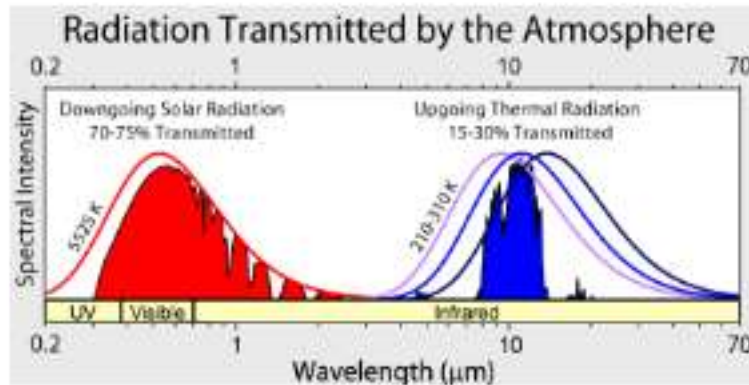
47 % της ολικής έντασης

* $ly = \text{langley}, 1 ly = 11.628 Wh/m^2$

$1 ly / min = 1 cal / cm^2 / min = 697.8 W / m^2$

Θεωρείται ότι και η Γη ακτινοβολεί ως «μέλαν σώμα» σε θερμοκρασία.

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



Πηγή:

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f6/Planck_law_log_log_scale.png

Στη πραγματικότητα όμως η Γη δεν ακτινοβολεί ως τέλειο μέλαν σώμα (διότι η ικανότητα εκπομπής της μεταβάλλεται με το μήκος κύματος). 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 εκπέμπεται από τα **4μm** μέχρι τα **100μm** (Θερμικό υπέρυθρο)

Το μέγιστο της γήινης ακτινοβολίας που εκπέμπεται, αντιστοιχεί στα **10μm** και ισούται με:

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

Η γήινη ακτινοβολία καλείται μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία



Πηγή: with the courtesy of E. Kodouli

Στη Γη φθάνει πολύ μικρό τμήμα της συνολικά εκπεμπόμενης ενέργειας από τον Ήλιο

- **Ηλιακή σταθερά:** η τιμή της έντασής της ηλιακής ακτινοβολίας που μετρίεται στην κορυφή της ατμόσφαιρας όταν η γη βρίσκεται στη μέση της απόστασής της από τον Ήλιο.

Ορίζεται, ως η συνολική ηλιακή ενέργεια που διέρχεται από τη μονάδα επιφανείας (1m^2) τοποθετημένη κάθετα στις ηλιακές ακτίνες **ΕΞΩ από την ατμόσφαιρα** στη μονάδα του χρόνου και σε απόσταση από τον ήλιο ίση με 1 αστρονομική μονάδα ($149,5 \times 10^6 \text{km}$)

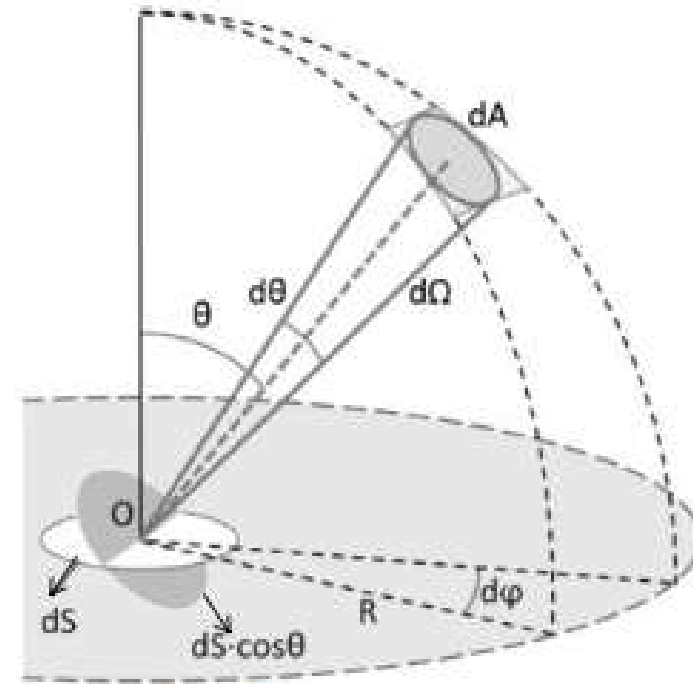
Στην ουσία αντιπροσωπεύει το ποσό ενέργειας που έχει στη διάθεσή του ο πλανήτης

Ειδική Ένταση Ακτινοβολίας (Specific Intensity) $I_{(\lambda)}$: το ποσό της ενέργειας $dQ_{(\lambda)}$ ακτινοβολίας μήκους κύματος λ , η οποία προσπίπτει σε μια στοιχειώδη επιφάνεια dS σε χρόνο dt από μια διεύθυνση μέσα σε στερεά γωνία $d\Omega$, δια του εμβαδού της προβολής της επιφάνειας dS σε επίπεδο κάθετο προς τη διεύθυνση.

θ είναι η γωνία μεταξύ της καθέτου της επιφανείας dS και της διεύθυνσης

Μονάδες μέτρησης: $W/m^2/\Omega/\mu m$

$$I_{(\lambda)} = \frac{dQ_{(\lambda)}}{dt \cdot d\lambda \cdot d\Omega \cdot dS \cdot \cos\theta} \quad W/m^2/\Omega/\mu m$$

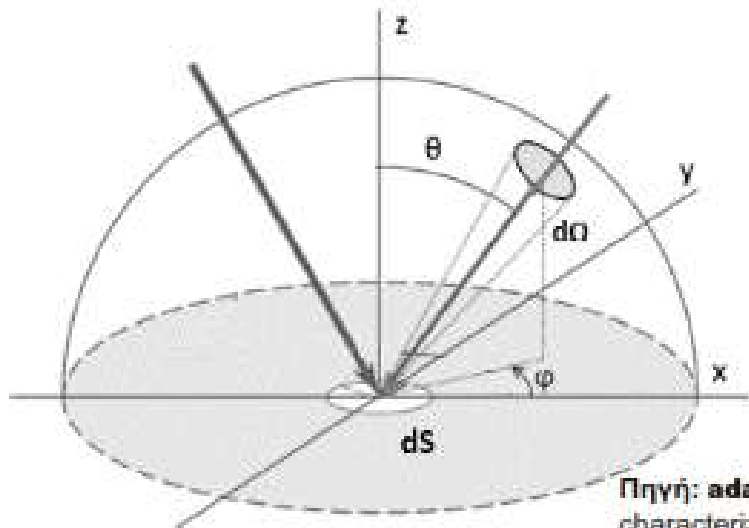


Πηγή: N Matsapey et al 2013, Design of a gonio-spectro-photometer for optical characterization of gonio-apparent materials, *Meas. Sci. Technol.* 24 065901

Για τον υπολογισμό της ολικής έντασης της ακτινοβολίας η πάνω σχέση ολοκληρώνεται για όλα τα μήκη κύματος και προκύπτει:

$$I = \int_{\lambda} I_{(\lambda)} d\lambda$$

Ροή Ακτινοβολίας (Radiant flux) $F_{(\lambda)}$: το ποσό της ενέργειας $dQ_{(\lambda)}$ ακτινοβολίας μήκους κύματος λ , η οποία διέρχεται από μια στοιχειώδη επιφάνεια dS σε χρόνο dt από όλες τις διευθύνσεις μέσα σε ένα ημισφαίριο με βάση dS .



Μονάδες μέτρησης: **W/m²/μm**

(B_N)

$$F_{(\lambda)} = \frac{dQ_{(\lambda)}}{dt \cdot dS \cdot d\lambda}$$

Πηγή: **adapted from:** N Matsapey *et al* 2013, Design of a gonio-spectro-photometer for optical characterization of gonio-apparent materials, *Meas. Sci. Technol.* 24 065901

Στην ουσία η ροή ακτινοβολίας είναι το ολοκλήρωμα της έντασης ακτινοβολίας μέσα σε ένα ημισφαίριο:

(B_N)

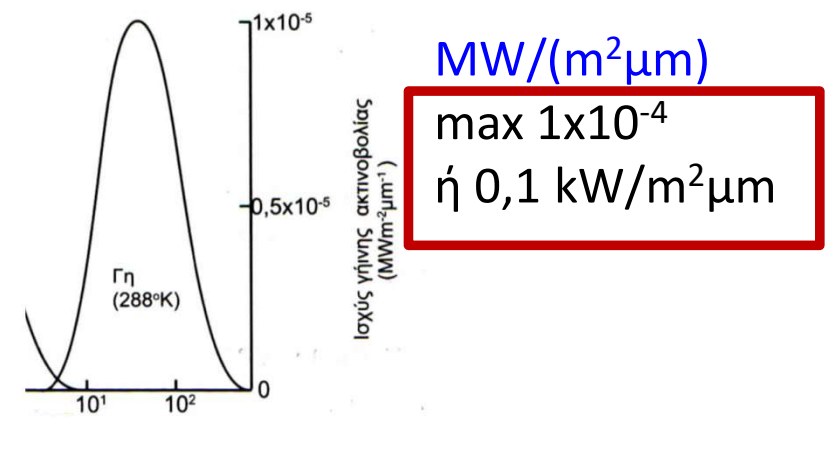
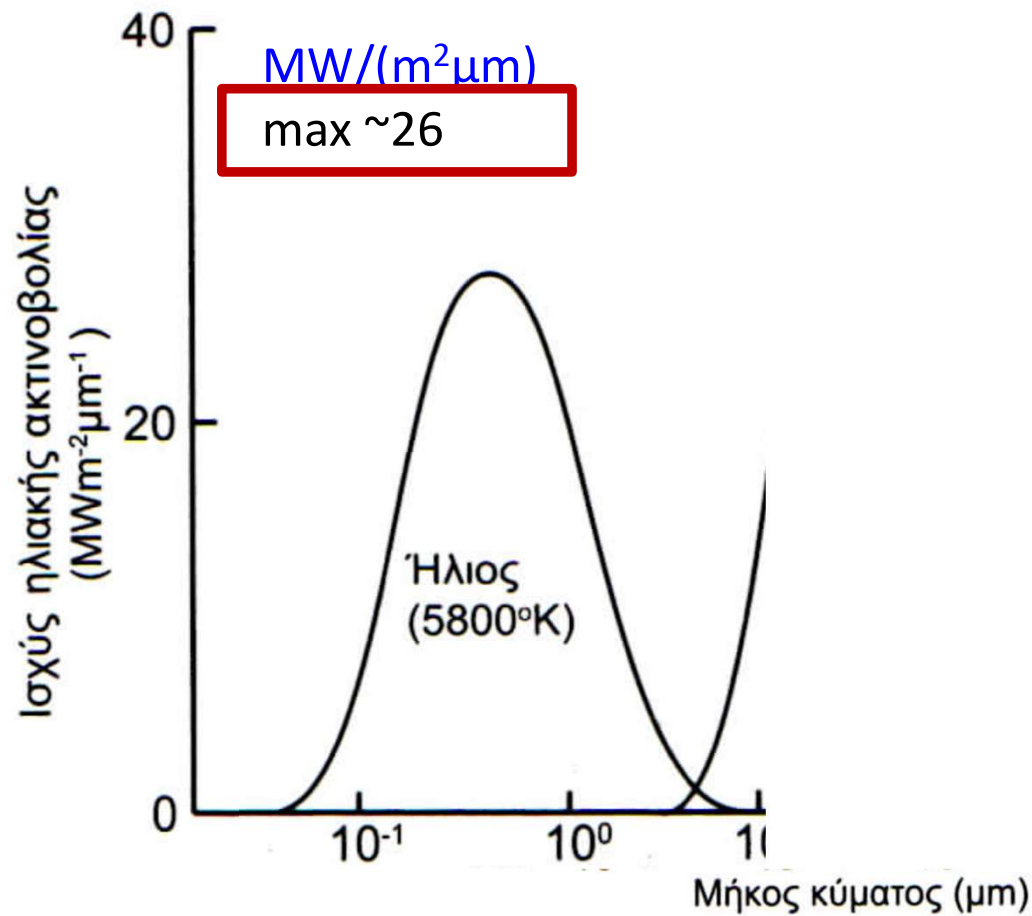
$$F_{(\lambda)} = \int I_{(\lambda)} \sin\theta \cdot d\Omega$$

Ολοφασματική (ολική) Ροή Ακτινοβολίας (Radiant flux) F : η ροή ακτινοβολίας που εκπέμπει η πηγή ή που προσπίπτει σε όλα τα μήκη κύματος. Υπολογίζεται αν ολοκληρωθεί σε όλα τα μήκη κύματος λ :

$$F = \int_{\lambda} F_{(\lambda)} d\lambda$$

(B)

Μονάδες μέτρησης: **W/m²**



Διάγραμμα που παρουσιάζει την ακτινοβολία μικρού και μεγάλου μήκους κύματος, ως συνάρτηση της ισχύος της ακτινοβολίας

Ακτινοβολία μέλανος σώματος

Μέλαν σώμα: το σώμα που απορροφά όλη την ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτό ακτινοβολεί το μέγιστο ποσό ενέργειας σε κάθε κατεύθυνση και προς όλες τις διευθύνσεις (ισότροπα)

Νόμος του Planck

$$B_{\lambda} = \frac{\text{ενέργεια}}{\text{χρόνος} \cdot \text{επιφάνεια} \cdot \text{στερεά γωνία}}$$
$$B_{\lambda}(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/(\lambda kT)} - 1} \quad \left[\frac{W}{m^3} \right]$$

k_B η σταθερά Boltzmann ($=1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/grad}$)

c η ταχύτητα του φωτός, $\sim 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

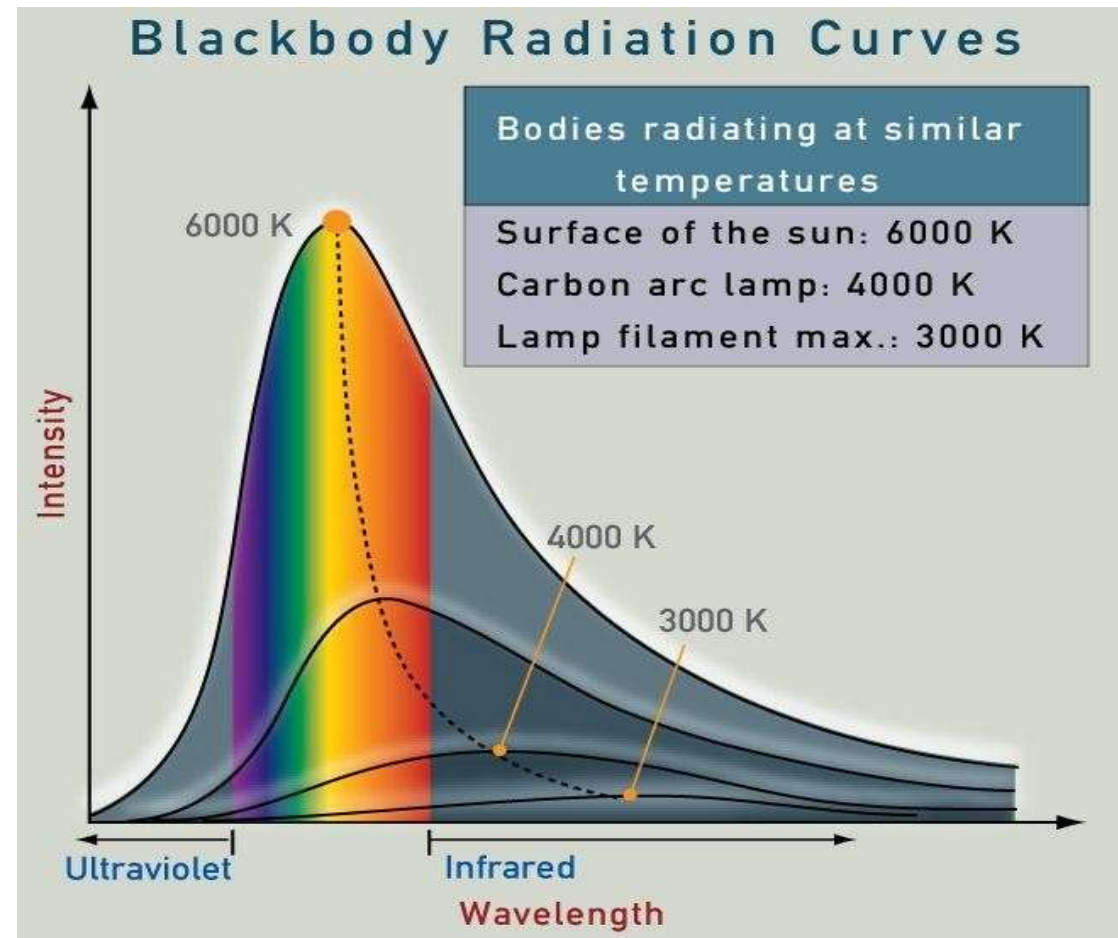
λ μήκος κύματος (m) και

h η σταθερά του Planck ($=6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$)

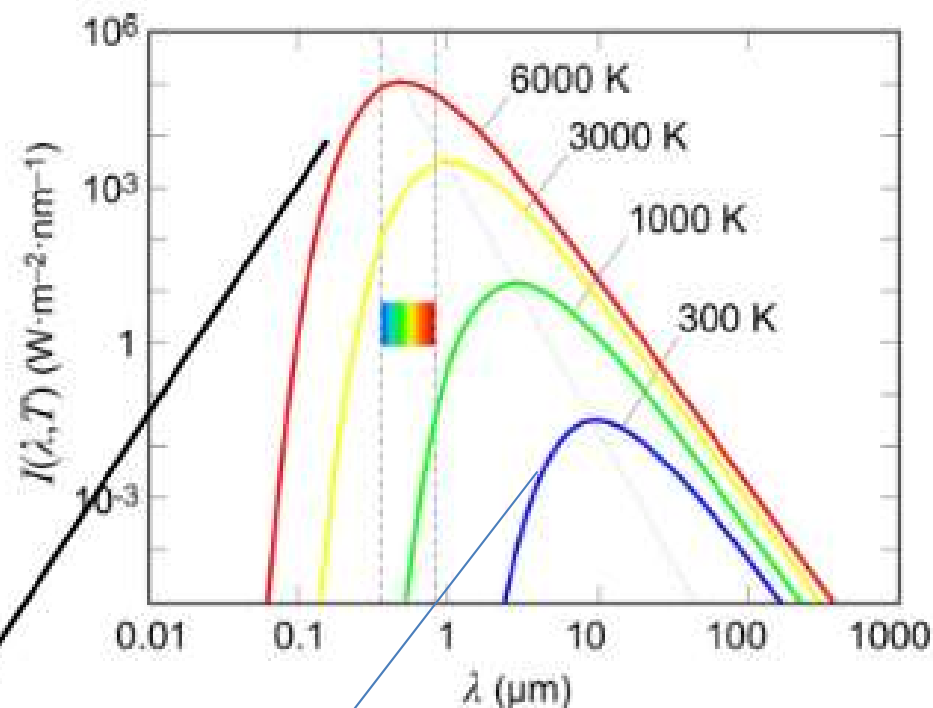
• Για ένα πραγματικό σώμα:

$$I_{\lambda} = \varepsilon_{(\lambda)} I_{(\lambda)}$$

$\varepsilon_{(\lambda)}$: συντελεστής εκπομπής, $\varepsilon_{(\lambda)} < 1$



Φασματική κατανομή της έντασης ακτινοβολίας μέλανος σώματος σε διάφορες θερμοκρασίες



Πηγή: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f6/Planck_law_log_log_scale.png

Ο Ήλιος εκπέμπει σαν μέλαν σώμα περίπου στους 6000 K

Μέλαν σώμα με θερμοκρασία ίση περίπου με αυτή της Γης εκπέμπει ακτινοβολία στην περιοχή του υπέρυθρου

Ισοζύγιο ηλιακής και γήινης ακτινοβολίας

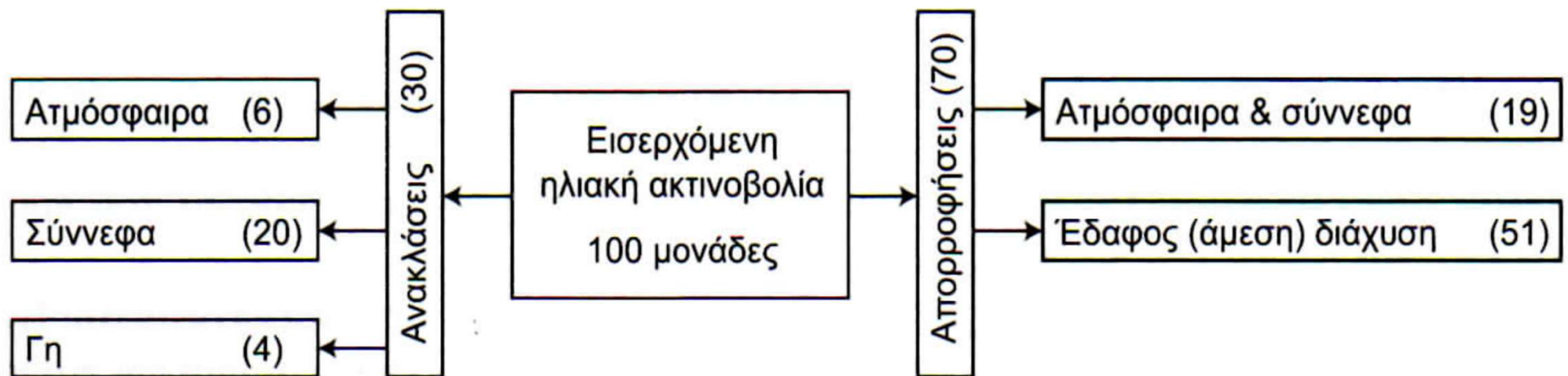
Από το σύνολο της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στην Γήινη ατμόσφαιρα

μόλις το 51% απορροφάται από το έδαφος.

Το 19%, απορροφάται από την ατμόσφαιρα, τα σύννεφα κ.λπ.

και από το υπόλοιπο 30%:

το 4% ανακλάται από το έδαφος, το 20% ανακλάται από τα σύννεφα και το 6% από την ατμόσφαιρα



Ο νόμος του Planck ορίζει ότι η φασματική ενεργειακή πυκνότητα της ακτινοβολίας μέλανος σώματος σε απόλυτη θερμοκρασία T , δίνεται από το τύπο:

$$u_\nu(T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3 \left\{ \exp \left[\frac{h\nu}{k_B T} \right] - 1 \right\}} \quad (\text{Js/m}^3)$$

εκθετική συνάρτηση
 $f(x) = \exp(x) = e^x$.

όπου: k_B η σταθερά Boltzmann ($=1,381 \cdot 10^{-23} \text{J/grad}$)
 c η ταχύτητα του φωτός ($\sim 3,00 \cdot 10^8 \text{m/s}$)
 ν η συχνότητα της ακτινοβολίας ($1/\text{s}$) και
 h η σταθερά του Planck ($=6,6261 \cdot 10^{-34} \text{Js}$)

Καθώς τα φωτόνια που μεταφέρουν αυτή την ενέργεια κινούνται ισοτροπικά, η ενεργειακή πυκνότητα που συνδυάζεται με μια ομάδα φωτονίων τα οποία κινούνται εντός μιας στερεάς γωνίας $\Delta\Omega$ στερακτινίων είναι:

$$u_\nu \Delta T / 4\pi$$

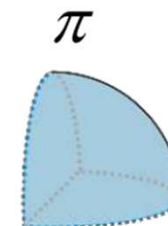
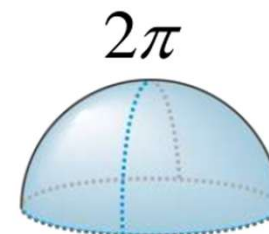
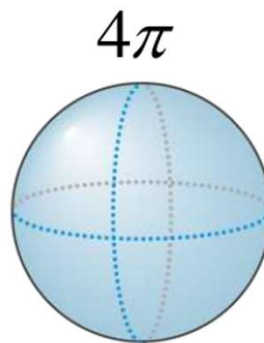
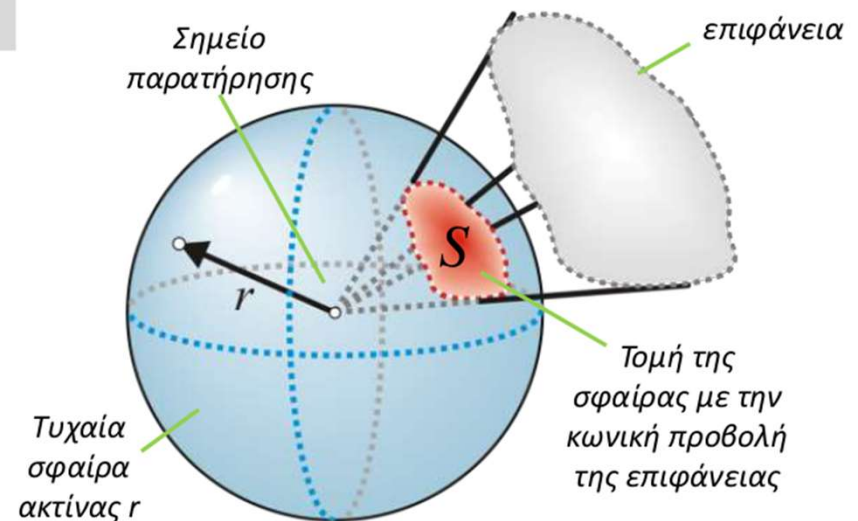
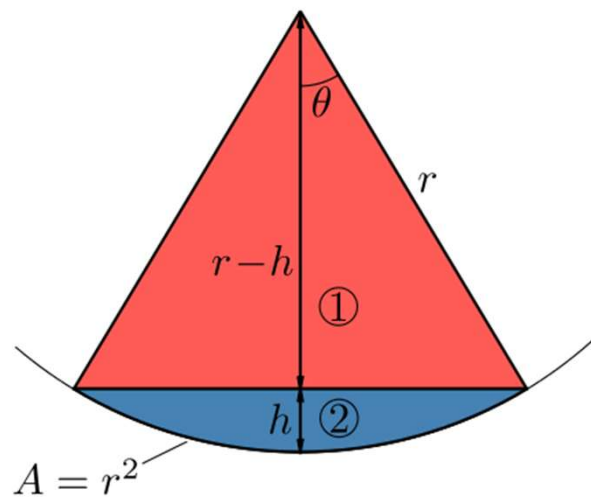
Με αυτό τον τρόπο θεωρείται μια γωνία σε μια σφαίρα με κέντρο O , ακτίνα R και τμήμα S .

Η στερεά γωνία μετράται σε στερακτίνια.

Στερεά γωνία

$$\Omega \equiv \frac{S}{r^2}$$

μονάδα 1 sr (στερακτίδιο)



Εάν θεωρηθεί η ενεργειακή ροή ανά μονάδα χρόνου και επιφάνειας που μεταφέρεται από αυτή την ομάδα φωτονίων, τότε φαίνεται ότι η ισχύς ανά μονάδα επιφανείας, ανά μονάδα στερεάς γωνίας και ανά μονάδα διαστήματος συχνοτήτων (φασματική ακτινοβολία) για την ακτινοβολία του μέλανος σώματος σε θερμοκρασία T , είναι:

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2 \left\{ \exp \left[\frac{h\nu}{k_B T} \right] - 1 \right\}} \quad (\text{J/m}^2)$$

εκθετική συνάρτηση

$$f(x) = \exp(x) = e^x.$$

**Ο αριθμός $e = 2.71828$
ονομάζεται αριθμός
του Euler**

Η συνάρτηση αυτή ονομάζεται συνάρτηση του Planck.

Η φασματική ακτινοβολία μέλανος σώματος μπορεί επίσης και να διατυπωθεί και ως ισχύς ανά μονάδα επιφανείας, ανά μονάδα στερεάς γωνίας και ανά μονάδα διαστήματος μηκών κύματος λ , με την εξίσωση:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left\{ \exp\left[\frac{hc}{\lambda k_B T}\right] - 1 \right\}} \rightarrow E_{\lambda b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left\{ \exp\left[\frac{C_2}{\lambda T}\right] - 1 \right\}}, \left[\frac{W}{m^2 \mu m} \right]$$

όπου: $C_1 = 2\pi hc^2 = 3,742 \times 10^8 W \mu m^4 / m^2$, $C_2 = hc_0 / k_B = 1,439 \times 10^4 \mu m K$ και $k_B = 1,3805 \times 10^{-23} J/K$

Με ολοκλήρωση της B_{λ} σε όλα τα μήκη κύματος, λαμβάνεται η ακτινοβολία μέλανος σώματος:

$$\int_0^{\infty} B_{\lambda}(T) d\lambda = \frac{\sigma}{\pi} T^4 \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

όπου: **σ , η σταθερά Stefan - Boltzmann ($= 5,67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$).**

Ο νόμος αυτός που προκύπτει από την ολοκλήρωση της εξίσωσης του Planck ονομάζεται νόμος Stefan – Boltzmann και διατυπώνεται από τη σχέση:

$$E = \sigma T^4 \quad \text{W/m}^2$$

Όπου E η ολική ολοφασματική εκπεμπόμενη ακτινοβολία από μέλαν σώμα θερμοκρασίας T , σταθερά Stefan-Boltzmann ($= 5,67 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^4$).

Η ένταση αυτή είναι η μέγιστη ένταση που μπορεί να εκπεμπευθεί. Για κάθε άλλο σώμα είναι **μικρότερη** με αποτέλεσμα να εισάγεται ο παράγοντας εκπομπής ϵ_λ .

Ο παράγων εκπομπής για όλα τα μήκη κύματος είναι $\epsilon_{\text{ολ}}$ και η εξίσωσή γράφεται:

$$E = \epsilon_{\text{ολ}} \sigma T^4 \quad \text{W/m}^2$$

Ακτινοβολία μέλανος σώματος

Νόμος του Wien

$$\lambda_{\max}^* = \frac{b}{T} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{T}$$

$$\lambda_{\max} * T \approx 3 \cdot 10^{-3}$$

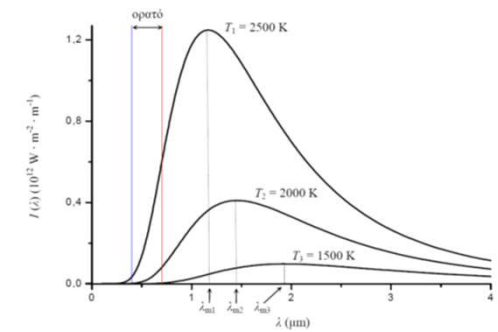
Νόμος Stefan-Boltzman

$$P = 4\pi R_s^2 \sigma T^4 \quad (\text{W})$$

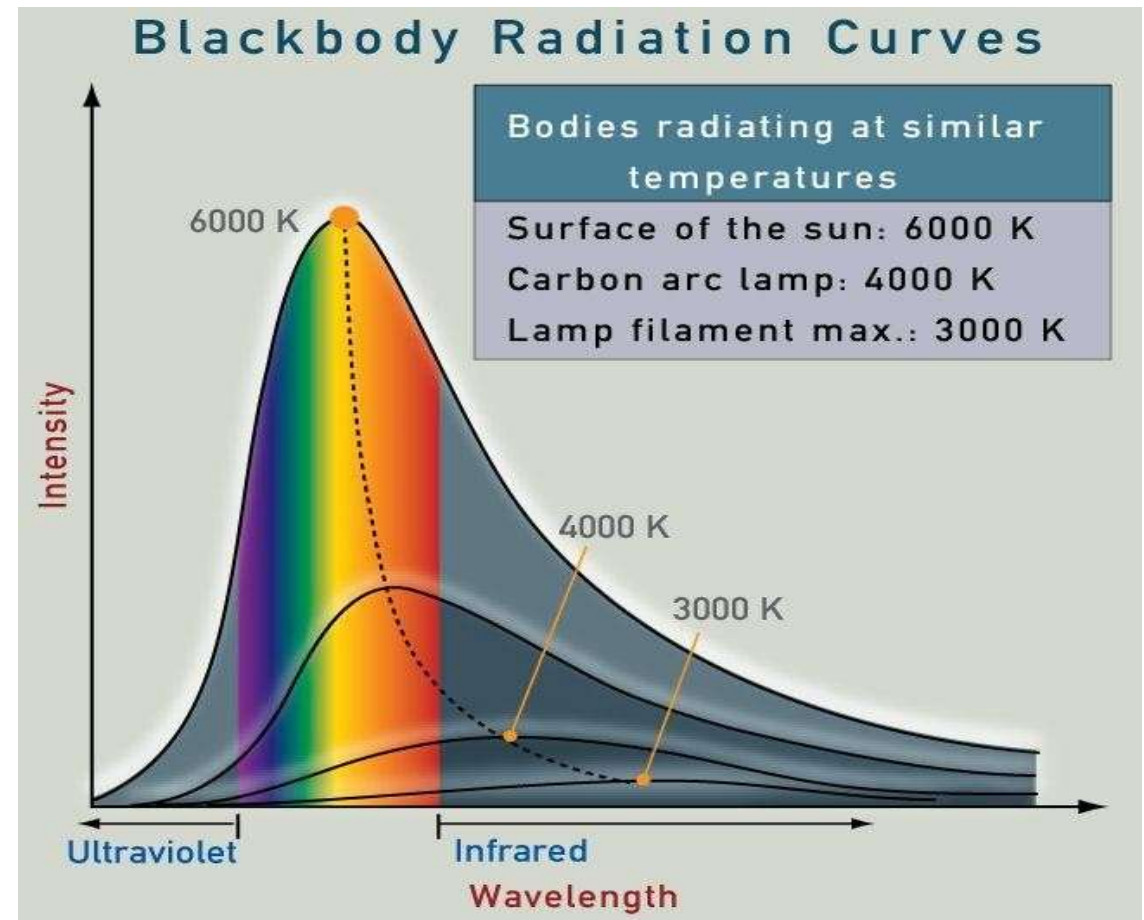
(τρόπος να υπολογισθεί η
«ακτίνα» των αστεριών)

$$b \approx 2,897771955... \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}, [1]$$

or $b \approx 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$



- * (τρόπος υπολογισμού της
.....«θερμοκρασίας» αστεριών)



Ορίζεται ως θερμοκρασία ακτινοβολίας (T_R) ενός σώματος η θερμοκρασία του μέλανος σώματος που εκπέμπει ροή ακτινοβολίας ίση με την ροή πραγματικού σώματος (φαιού)

Ως θερμοκρασία ακτινοβολίας ορίζεται η T_R και η εξίσωσή γράφεται:

$$\sigma T_R^4 = \epsilon_{o\lambda} \sigma T^4 \quad \text{W/m}^2$$

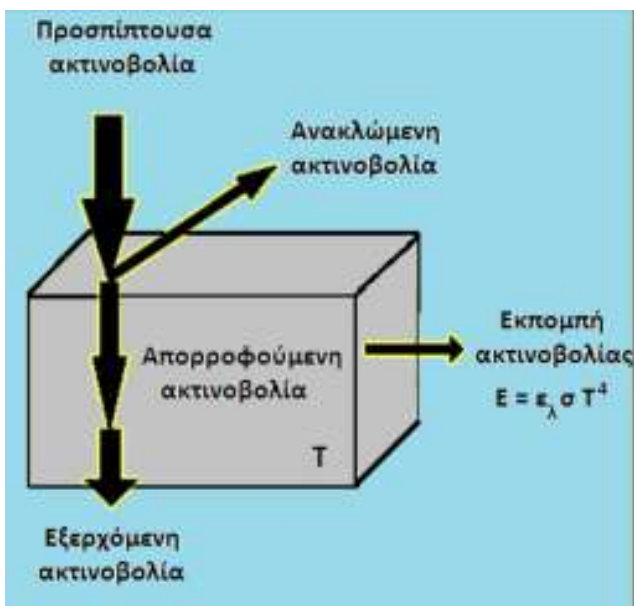
$$T_R = (\epsilon_{o\lambda})^{1/4} T \quad \text{K}$$

θερμοκρασία χρώματος είναι η θερμοκρασία του μέλανος σώματος που θα είχε λόγο ενεργειών στην κόκκινη και την μπλε ακτινοβολία ίσο με εκείνο του πραγματικού σώματος.

Με διαφορίση της εξίσωσής του Planck, $dB_\lambda/d\lambda=0$ εξάγεται....η εξίσωση Wien:

$$\lambda_{\max} = 2898/T \quad \dots \underline{\text{Wien}}$$

T , η θερμοκρασία λαμπρότητας του σώματος (φωτεινότητας, Kelvin) και $\lambda_{\max}$ σε μm .



Κάθε σώμα **εκπέμπει** ακτινοβολία στο περιβάλλον, ενέργειας **I** όταν η θερμοκρασία του είναι μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν ($>0 \text{ K}$ (ή $-273,15^\circ \text{ C}$))

Η ικανότητα εκπομπής [$\epsilon(\lambda)$, emissivity] του πραγματικού σώματος για ορισμένο μήκος κύματος λ , ορίζεται από το πηλίκο της έντασης ακτινοβολίας **$I_{emit(\lambda)}$** που εκπέμπει το σώμα σε θερμοκρασία T , προς την ένταση ακτινοβολίας **$I_{(\lambda)M}$** του ίδιου μήκους κύματος που εκπέμπει **το μέλαν σώμα** στην ίδια θερμοκρασία:

$$\epsilon_{(\lambda)} = \frac{I_{emit(\lambda)}}{I_{(\lambda)M}}$$

ένα σώμα επίσης μπορεί να **απορροφά μέρος της** ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτό

Η ικανότητα απορρόφησης [$\alpha(\lambda)$, absorptivity] του πραγματικού σώματος για ορισμένο μήκος κύματος λ , ορίζεται από το πηλίκο της έντασης ακτινοβολίας **$I_{abs(\lambda)}$** που απορροφά το σώμα σε θερμοκρασία T , προς την ένταση ακτινοβολίας **$I_{(\lambda)M}$** του ίδιου μήκους κύματος που προσπίπτει σε αυτό:

$$\alpha_{(\lambda)} = \frac{I_{abs(\lambda)}}{I_{o(\lambda)}}$$

Νόμος Wien, μετατόπισης.

Εκφράζει το μήκος κύματος της μέγιστης εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από σώμα θερμοκρασίας T .

Για $T=288K$, (η μέση θερμοκρασία της Γης) το μήκος είναι **10-12 μm** $\rightarrow$ μεγάλου μήκους κύματος $\lambda > 0,4$.
ενώ για $\sim 6000K$, (της φωτόσφαιρας του Ήλιου) ίσο με **0,475 μm** $\rightarrow$ μικρού μήκους κύματος $\lambda < 0,4$.

Παράγων εκπομπής (αφετικότητας) $e_v \leq 1$

Παράγων απορροφητικότητας $a_v \leq 1$

Ο νόμος Kirchhoff ορίζει $e_v = a_v \leq 1$ που σημαίνει ότι για ορισμένη θερμοκρασία και συχνότητα η φασματική εκπομπή είναι ίση με την φασματική απορροφητικότητα, υπό την προϋπόθεση ότι το σώμα είναι σε θερμοδυναμική ισορροπία.

Ο νόμος του Kirchhoff

Όταν ένα σώμα βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία, τότε ο λόγος **της εκπομπής $I(\lambda)$** προς το **συντελεστή απορρόφησης $a_{(\lambda)}$** , δεν εξαρτάται από τη φύση του υλικού. Εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία του (T) και το μήκος κύματος (λ). Δηλαδή:

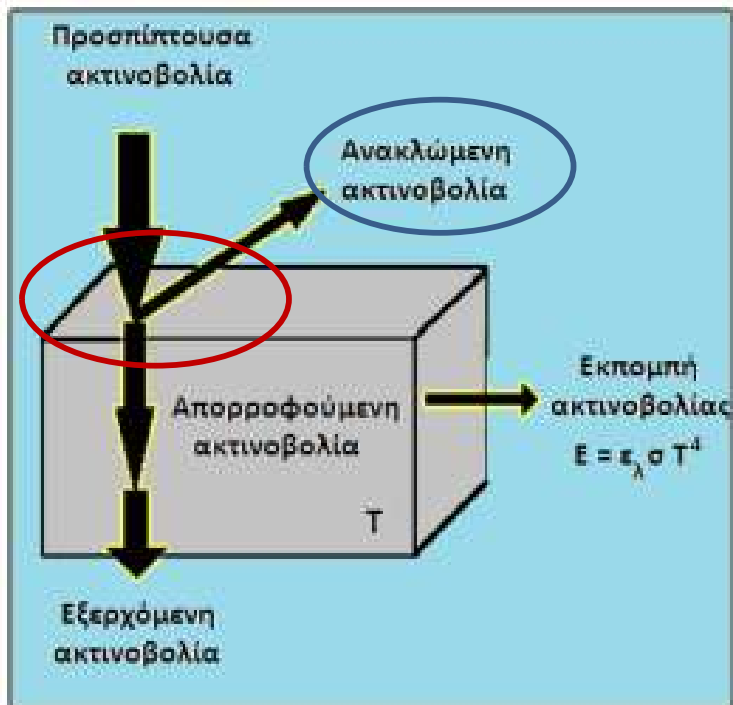
$$I_{\lambda} / a_{(\lambda)} = f(\lambda, T)$$

Για το μέλαν σώμα, για κάθε μήκος κύματος λ ισχύει: **$a(\lambda)=1$**

Για το πραγματικό σώμα, για κάθε μήκος κύματος λ ισχύει: **$a(\lambda)<1$**

Αφού το σώμα βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία, τότε την ενέργεια που απορροφά θα την εκπέμψει:

$$a_{(\lambda)} = \varepsilon_{(\lambda)} \dots \text{Νόμος του Kirchhoff}$$



Ανακλαστικότητα ή λευκαύγεια ($R_{(\lambda)}$, albedo)

Ένα σώμα ανακλά μέρος της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτό.

Η ανακλαστικότητα ή λευκαύγεια ($R_{(\lambda)}$, albedo) πραγματικού σώματος για ένα ορισμένο μήκος κύματος λ , ορίζεται από το πηλίκο της έντασης ακτινοβολίας $I_{ref(\lambda)}$ που ανακλάται από το σώμα προς την ένταση της ακτινοβολίας $I_{o(\lambda)}$ που προσπίπτει σε αυτό:

$$R_{(\lambda)} = \frac{I_{ref}(\lambda)}{I_{o(\lambda)}}$$

Ισχύει:

$$\alpha_{(\lambda)} + R_{(\lambda)} = 1$$

Εξαρτάται από το μήκος κύματος (λ), τη γωνία πρόσπτωσης και τη φύση του σώματος.

Διάδοση της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα.

Η ένταση στο έδαφος για λ που διαδίδεται κάθετα σε μια ομοιογενή ατμόσφαιρα ...

$$I = I_0 \exp\left(-\int_0^H \alpha dH\right)$$

Όπου I η ένταση ακτινοβολίας στο έδαφος, I_0 η ένταση στην κορυφή της στήλης ύψους H και α ο παράγων εξασθένισης της μονοχρωματικής ακτινοβολίας (νόμος Beer-Lambert).

Ο παράγων α εξαρτάται από την σκέδαση και την απορρόφηση της ακτινοβολίας **και είναι το άθροισμα των δύο όρων.**

Επίσης εξαρτάται από την **πίεση**, την **θερμοκρασία** και το **μήκος κύματος**, συνεπώς:

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\alpha H) = T_R$$

T_R διαπερατότητα ατμόσφαιρας

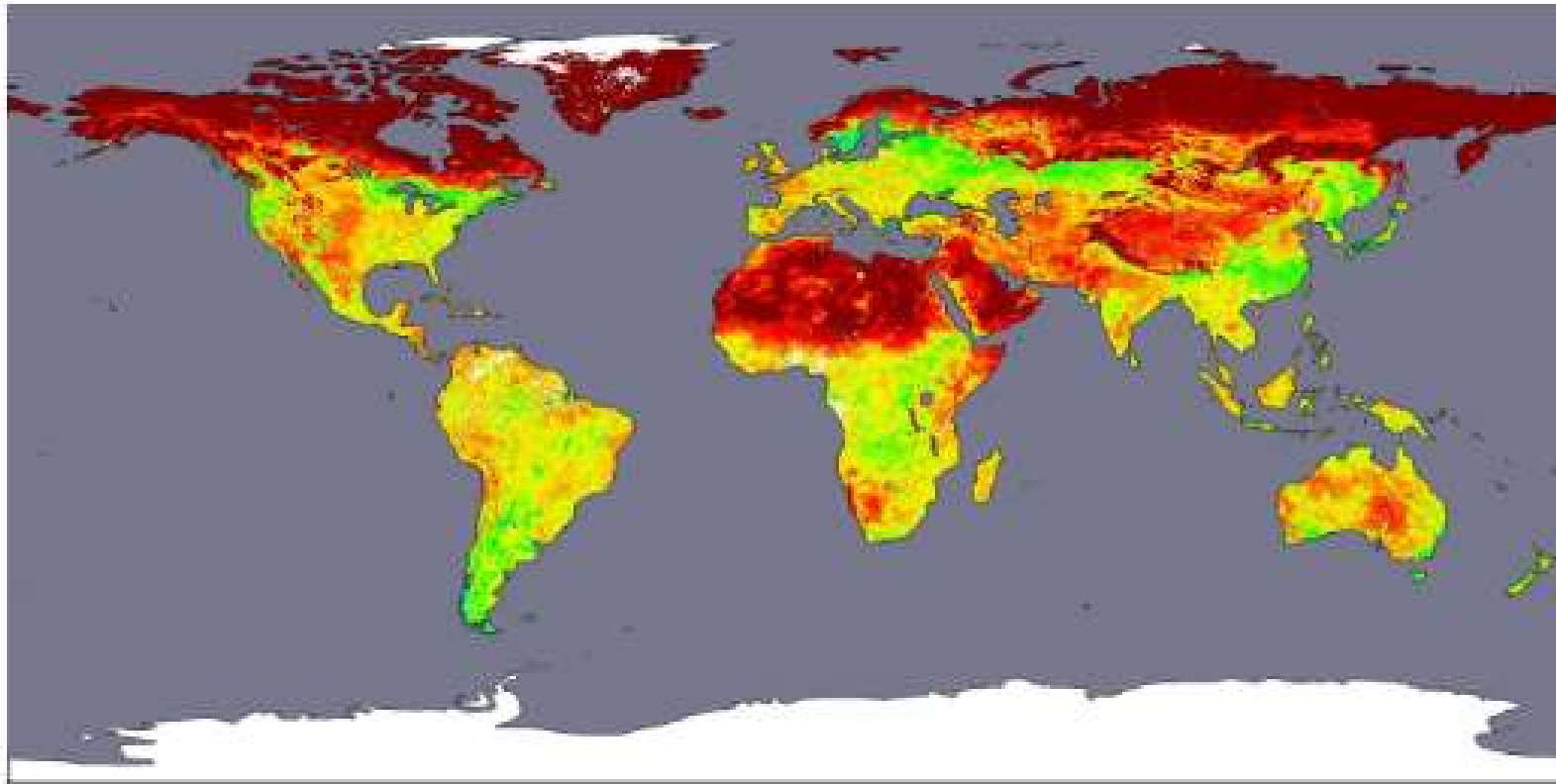
Με την ίδια λογική ορίζεται και η **ανακλαστικότητα (ή λευκαύγεια)**, ως ο λόγος της ανακλώμενης προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία.

Η ανακλαστικότητα του εδάφους εξαρτάται από την υγρασία, την περιεκτικότητα σε οργανικές ουσίες το χρώμα και την υφή.

Τιμές, λευκαύγειας (%) στον πίνακα

Τύπος επιφάνειας	Λευκαύγεια
Αστικό συγκρότημα	14-18
Άσφαλτος	4-12
Άμμος	18-28
Χλόη	16-20
Έρημος	40
Δάσος	14-20
Πυκνό δάσος	5-10
Τσιμέντο	55
Χιόνι (νέο)	75-95
Χιόνι (παλιό)	40-60
Ωκεάνιος πάγος	50-70

■ Γεωγραφική κατανομή της λευκαύγειας (R_s) της επιφάνειας του πλανήτη

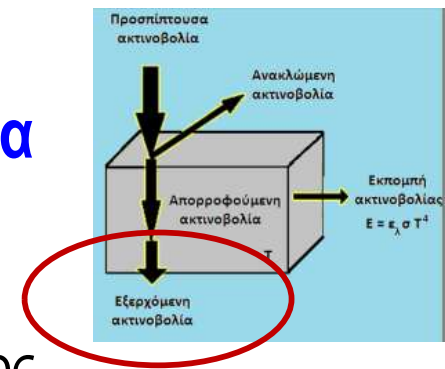


Πηγή: <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=2599>, εικόνα από τον δορυφόρο MODIS Terra

- Μέση λευκαύγεια της Γης χωρίς νέφη = 15%
- Μέση λευκαύγεια της Γης με νεφοσκεπή ουρανό 50%
- **Μέση λευκαύγεια της Γης= 32.5%**

Διαπερατότητα ($\tau_{(\lambda)}$, transmissivity or transmittance)

Ένα μέρος της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε ένα σώμα εξέρχεται από αυτό διαπερνώντας το.



Η **διαπερατότητα ($\tau_{(\lambda)}$)** πραγματικού σώματος για ένα ορισμένο μήκος κύματος λ , ορίζεται από το πηλίκο της έντασης ακτινοβολίας $I_{trans(\lambda)}$ που διαπερνά το σώμα προς την ένταση της ακτινοβολίας $I_{oin(\lambda)}$ που εισέρχεται σε αυτό ... ή που προσπίπτει σε αυτό

$$\tau_{(\lambda)} = \frac{I_{trans(\lambda)}}{I_{oin(\lambda)}}$$

$$R_{(\lambda)} = \frac{I_{ref(\lambda)}}{I_{oin(\lambda)}}$$

ανακλαστικότητα

$$\alpha_{(\lambda)} = \frac{I_{abs(\lambda)}}{I_{oin(\lambda)}}$$

απορροφητικότητα

$$\tau_{(\lambda)} = \frac{I_{trans(\lambda)}}{I_{oin(\lambda)}}$$

διαπερατότητα

ισχύει
$$R_{(\lambda)} + \alpha_{(\lambda)} + \tau_{(\lambda)} = 1$$

ή
$$I_{ref(\lambda)} + I_{abs(\lambda)} + I_{trans(\lambda)} = I_{tot(\lambda)}$$

Για την ατμόσφαιρα η Διαπερατότητα δίδεται από το νόμο των Beer-Lambert:

$$I = I_0 e^{-bm}$$

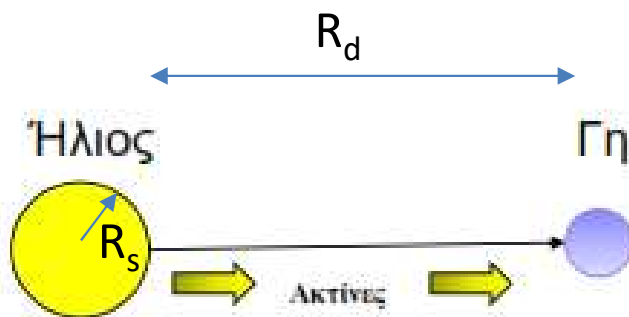
Όπου: b : ο συνολικός παράγων εξασθένησης εντός της ατμόσφαιρας

m : η συνολική διαδρομή που διασχίζει η ακτινοβολία

Εξαρτάται από τη φύση του σώματος (σύσταση της ατμόσφαιρας), το μήκος κύματος (λ) και τη διαδρομή που διασχίζει η ακτινοβολία μέσα στην ατμόσφαιρα

- Πόση ακτινοβολία φτάνει στη Γή ;

Τί ακτινοβολία φτάνει στη Γη?



Έστω ο Ήλιος εκπέμπει ενέργεια από ολόκληρη την επιφάνειά του με ρυθμό F

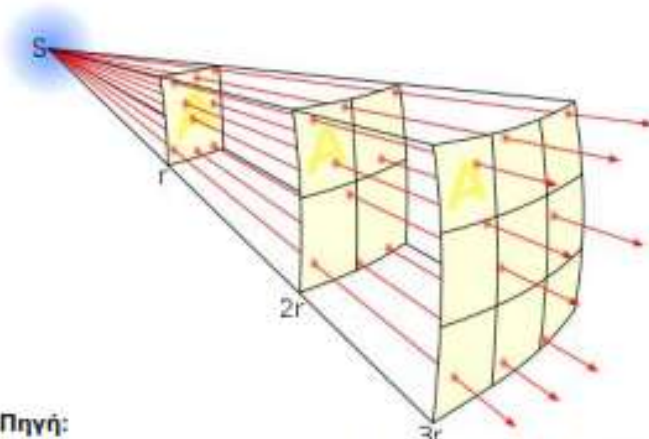
Ο ήλιος εκπέμπει ενέργεια ομοιόμορφα προ όλες τις διευθύνσεις στο χώρο

Αν R_s η ακτίνα του Ήλιου και R_d η μέση απόσταση Γης – Ήλιου

...

.. Τότε με βάση το νόμο των αντιστρόφων τετραγώνων ...

Πηγή: with the courtesy of E. Kodouli



Πηγή:
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/28/Inverse_square_law.svg/2000px-Inverse_square_law.svg.png

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



Ηλιακή σταθερά

Η τιμή της Ηλιακής Σταθερά βάσει σύγχρονων δορυφορικών παρατηρήσεων εκτιμάται

$1366.25 \pm 0.71 \text{ Wm}^{-2}$

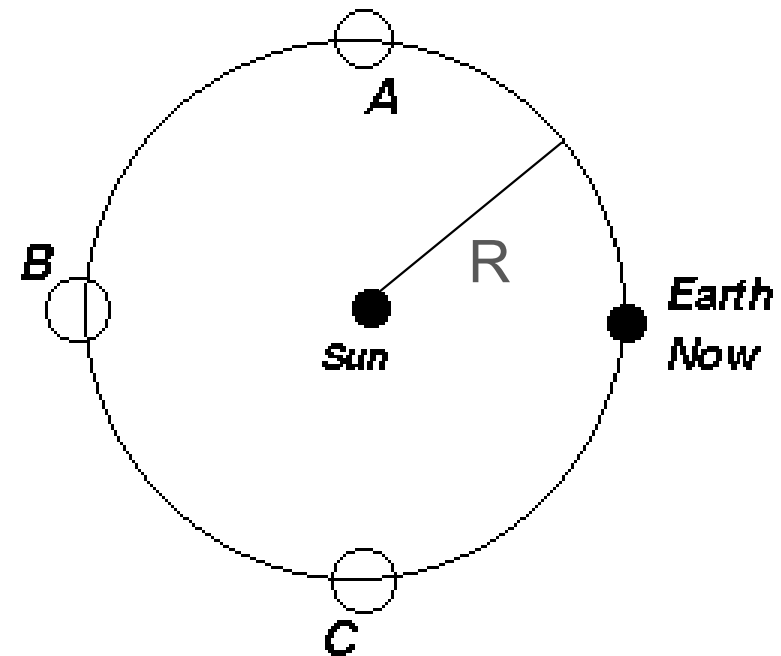
- Πόση ακτινοβολία φτάνει στη Γή ;

Τί ακτινοβολία φτάνει στη Γη?

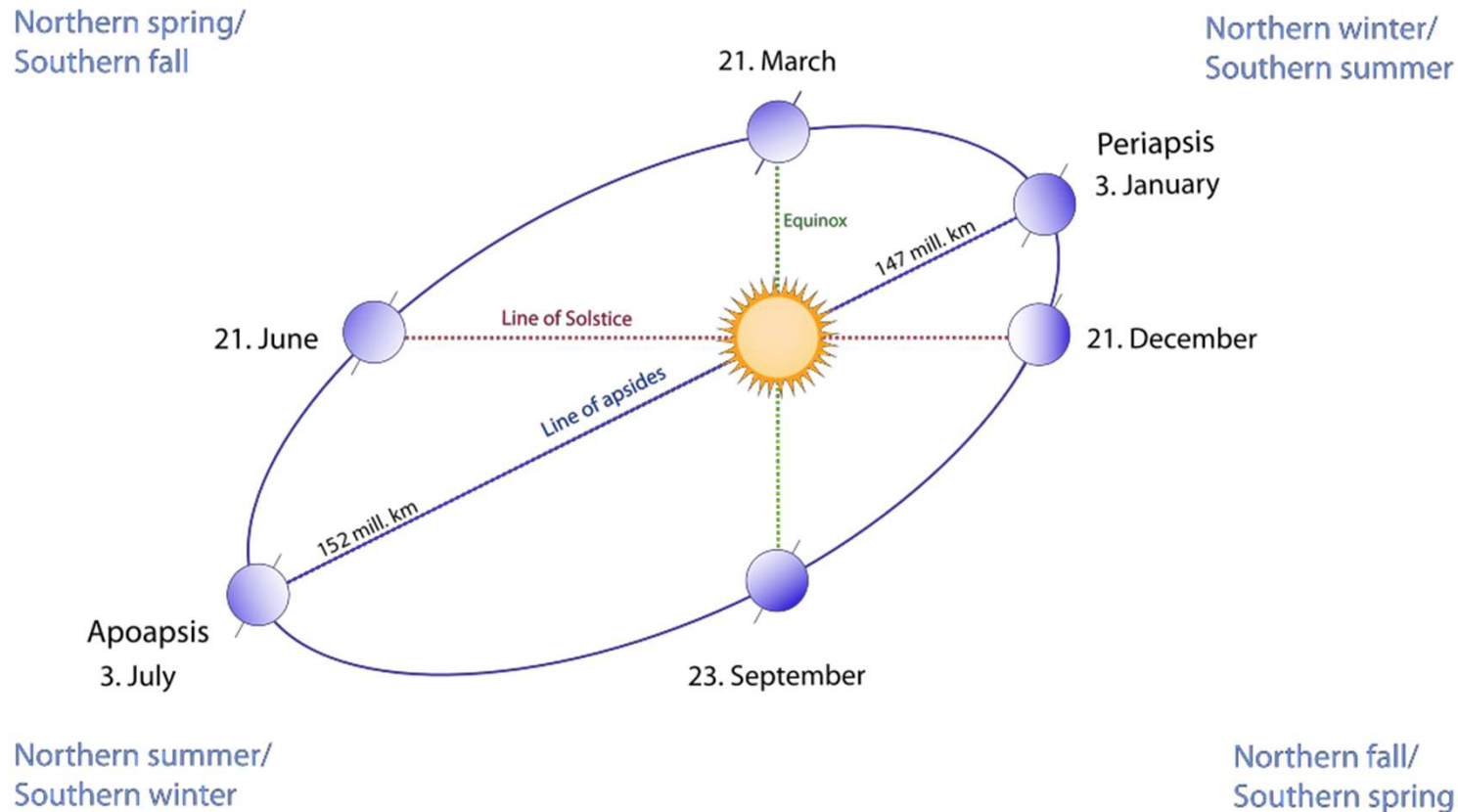
ηλιακή «σταθερά»

$$I = \frac{P}{4\pi R^2}$$

$$\sim 1367 \text{ W/m}^2 = S_0$$



Η απόσταση Γης-Ήλιου αλλάζει (τροχιά:έλλειψη)

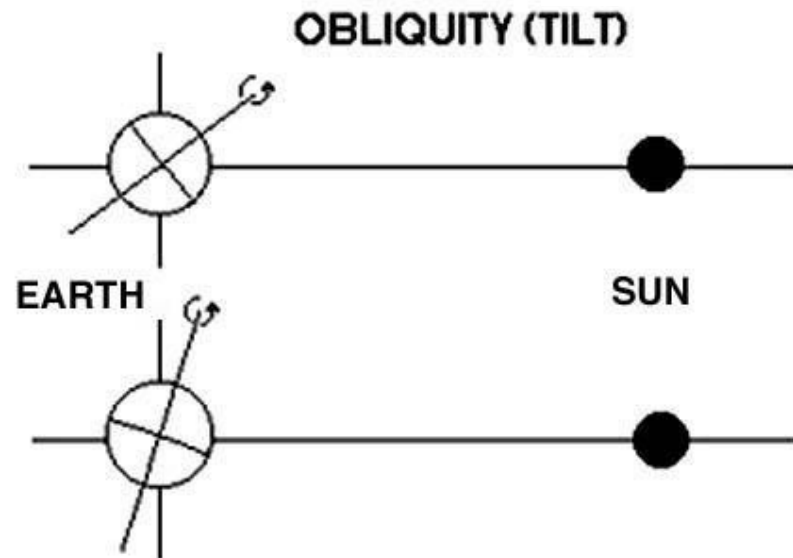
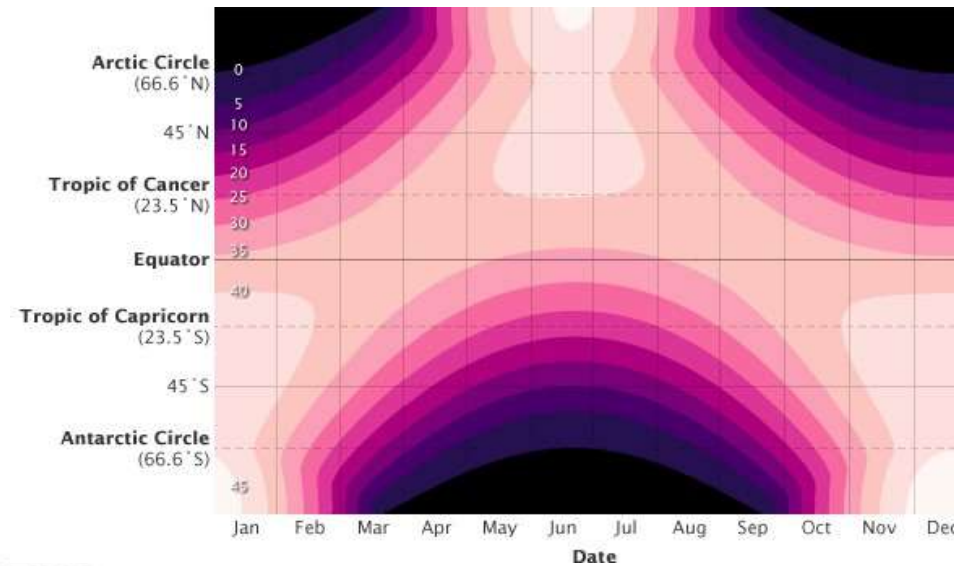


$$R = \frac{a(1-e^2)}{1+e \cos(\lambda-\bar{\omega})}$$

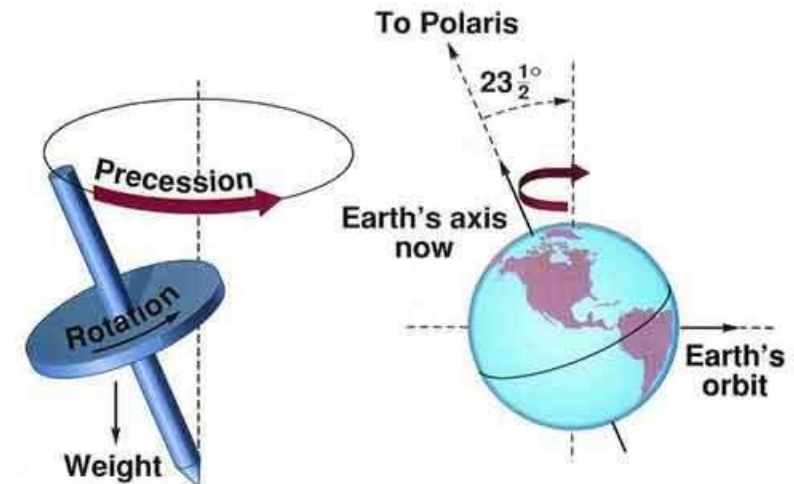
7 % διαφορά ακτιν. περιήλιο-αφήλιο

Η εκκεντρότητα e αλλάζει «περιοδικά» κάθε ~120.000 χρόνια

Ακτινοβολία στα όρια της ατμόσφαιρας (ΤΟΑ)



η λόξωση αλλάζει «περιοδικά»
κάθε 41.000 χρόνια (22° - 24°)

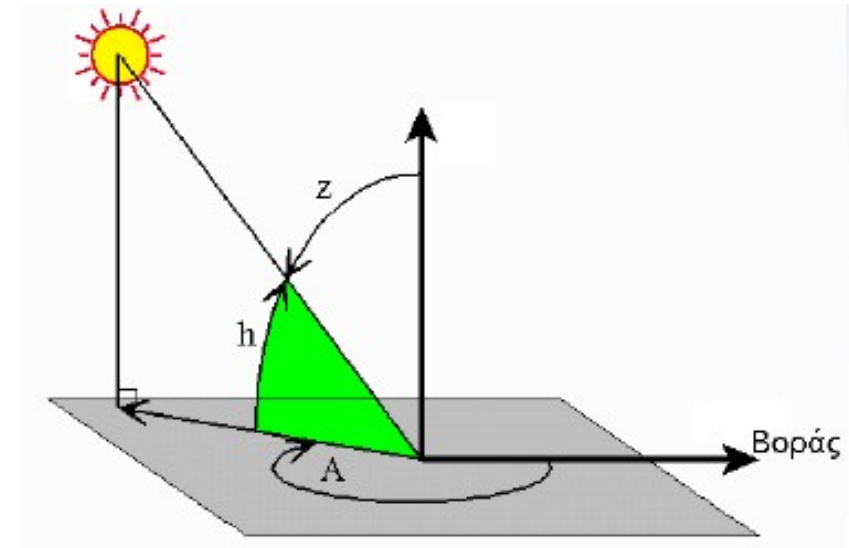


η μετάπτωση αλλάζει «περιοδικά»
κάθε 26.000 χρόνια

- Πόση ακτινοβολία φτάνει σε κάθε τόπο (χρόνο) ;

Ακτινοβολία στα όρια της ατμόσφαιρας (ΤΟΑ)

$$F = \int I dS = IS \cos z$$



Γωνία ζενίθ z εξαρτάται

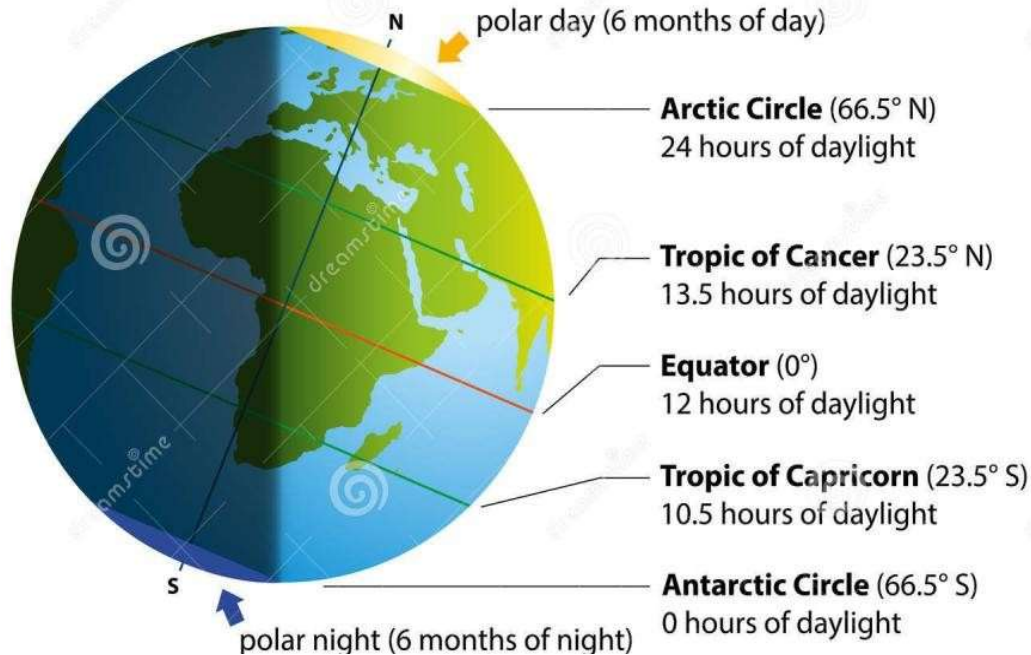
ώρα της ημέρας

εποχή

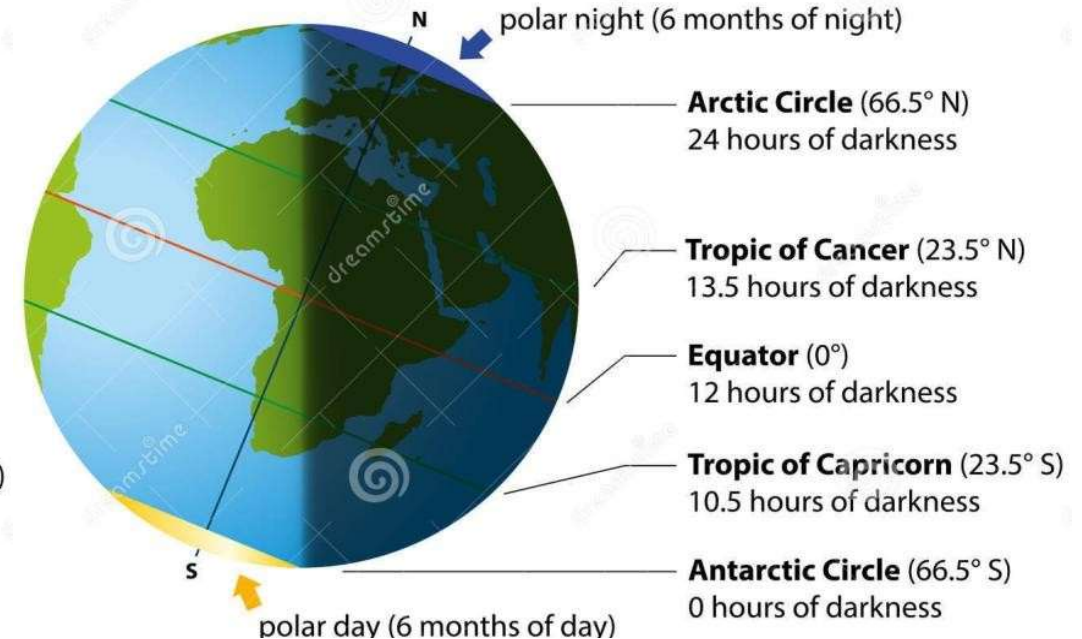
γεωγραφικό πλάτος

Ακτινοβολία στα όρια της ατμόσφαιρας (ΤΟΑ)

summer solstice (June 21)



winter solstice (December 21)



Γωνία ζενίθ z εξαρτάται

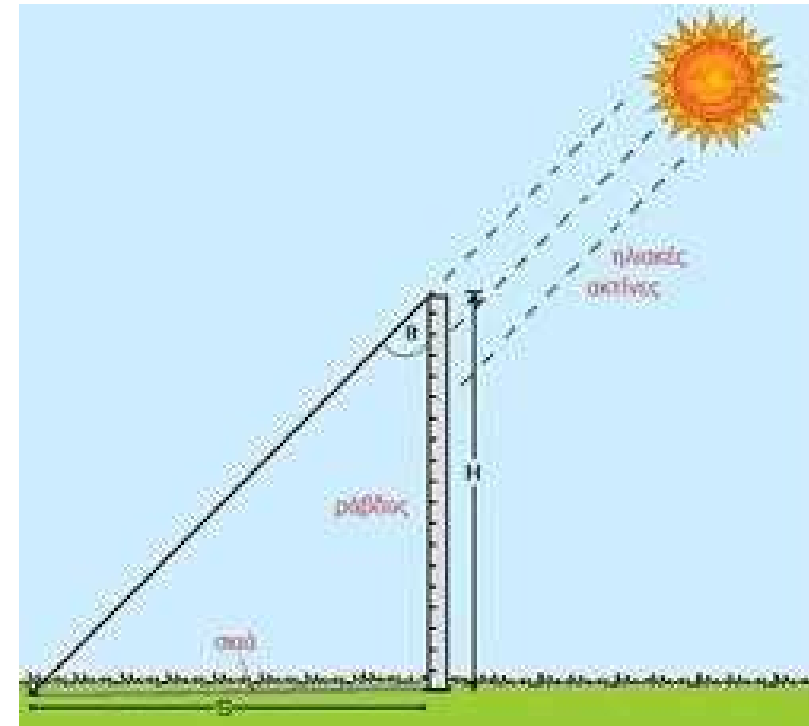
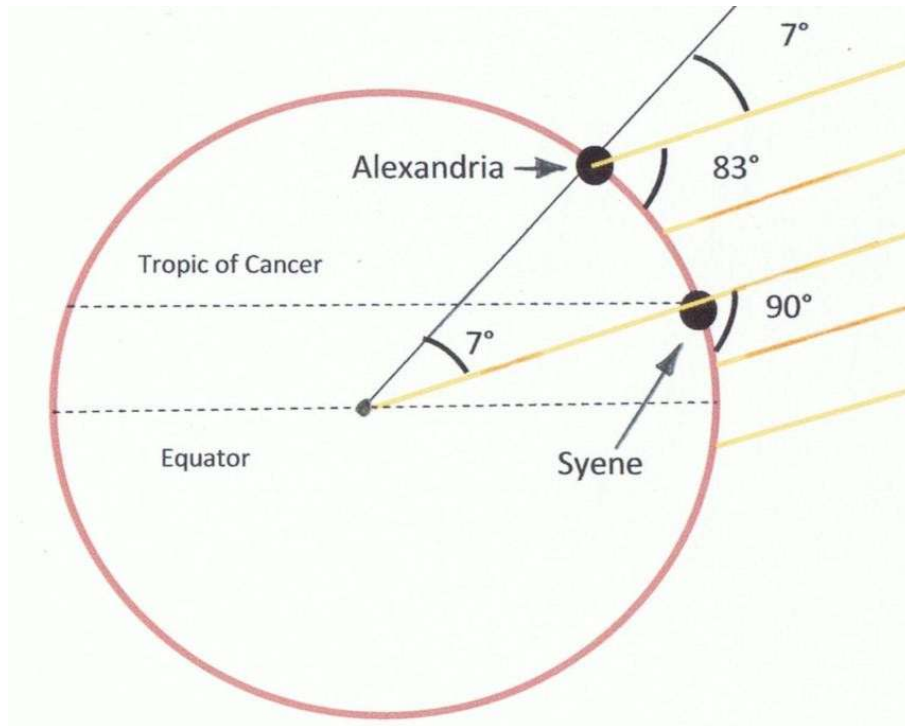
ώρα της ημέρας

εποχή

γεωγραφικό πλάτος

Ακτινοβολία στα όρια της ατμόσφαιρας (ΤΟΑ)

Το πείραμα του Ερατοσθένη (3^{ος} αιώνας π.χ)



Γωνία ζενίθ z εξαρτάται

ώρα της ημέρας

εποχή

γεωγραφικό πλάτος

□ Η μέση ισχύς που δέχεται το φωτισμένο τμήμα της Γης (θεωρώντας την χωρίς ατμόσφαιρα) είναι: $\bar{P} = \pi R_{\Gamma}^2 I_0 = 175.8 \times 10^{12} \text{ KW}$ 

 Άρα κατά τη διάρκεια μιας μέρας η Γη δέχεται από τον ήλιο ενέργεια:

$$Q_{sol} = \underline{4.2 \times 10^{16} \text{ KWh} / \text{day}} = 3.61 \times 10^{21} \text{ cal} / \text{day}$$

 Στη μοναδιαία επιφάνεια της Γης, η μέση ηλιακή ενέργεια που αντιστοιχεί είναι:

$$\bar{Q}_s = \frac{Q_{sol}}{4\pi R_{\Gamma}^2} = \underline{86.4 \text{ KWh} / \text{m}^2 / \text{day}} = 708.6 \text{ ly} / \text{day}$$

 Το αντίστοιχο ποσό για όλο το χρόνο είναι:

$$\bar{Q}_s = \underline{3 \times 10^4 \text{ KWh} / \text{m}^2 / \text{year}} = 256 \text{ Kly} / \text{year}$$

Μεταβολές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη Γη (Ηλιακής σταθεράς) λόγω **αστρονομικών παραγόντων**

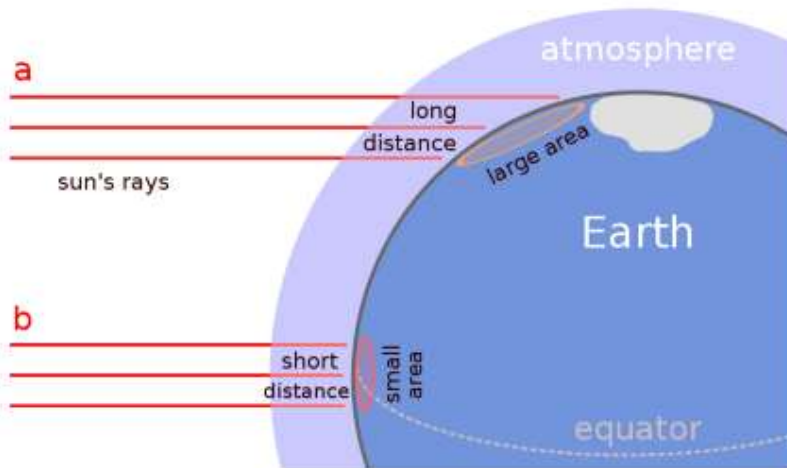
- Περιστροφή της Γης **γύρω από τον Ήλιο** σε ελλειπτική τροχιά



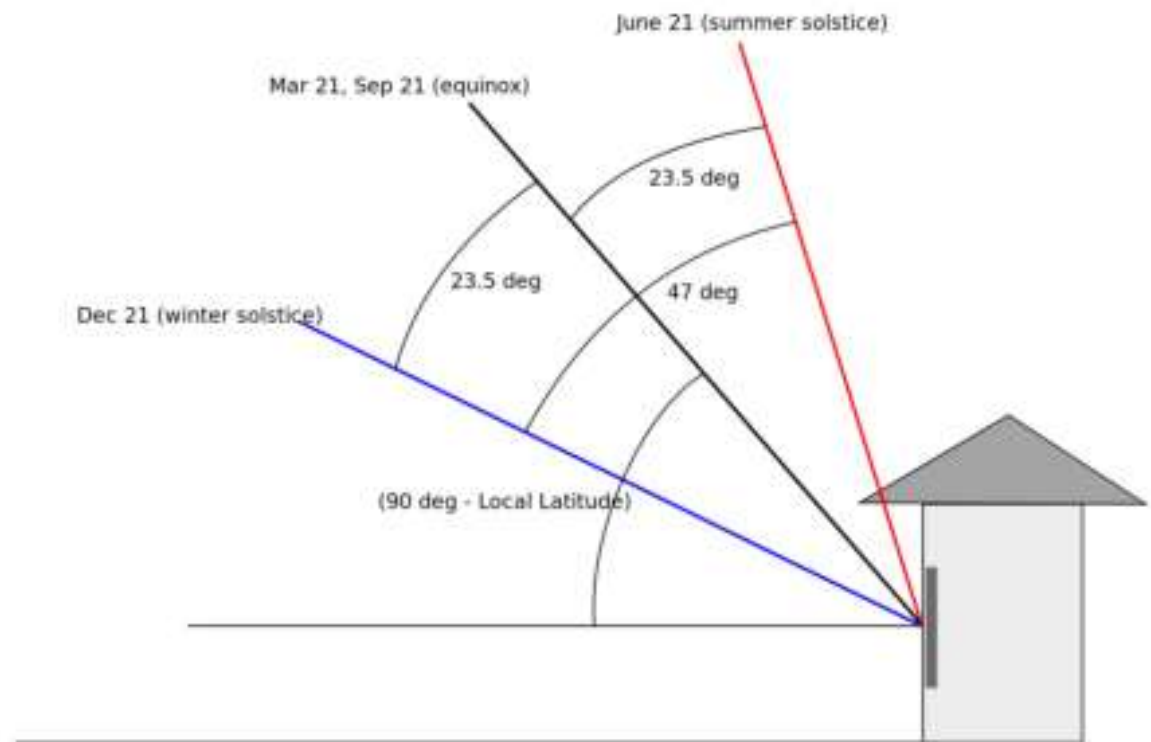
Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Earth%27s_rotation

- Περιστροφή της Γης **γύρω από τον άξονα της**
- Η **σφαιρικότητα** της & η **κλίση του άξονα** περιστροφής της Γης

- ⇒ Δημιουργούν **μεταβαλλόμενες συνθήκες πρόσπτωσης** της ηλιακής ακτινοβολίας σε έναν τόπο με αποτέλεσμα αυτή να μεταβάλλεται τόσο **χωρικά** όσο και **χρονικά** ⇒
- σε **ετήσια βάση** και
 - σε **ημερήσια βάση**
 - με το **γεωγραφικό πλάτος**



Πηγή https://en.wikipedia.org/wiki/Effect_of_sun_angle_on_climate



Πηγή https://en.wikipedia.org/wiki/Sun_path

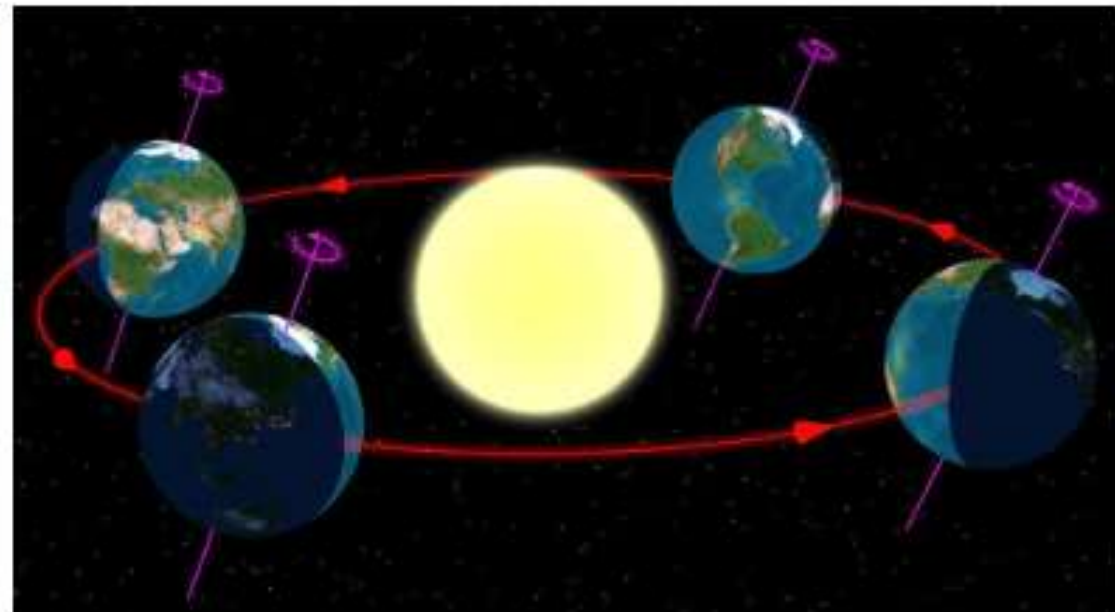
- Εξαιτίας της ελλειπτικής τροχιάς της Γης γύρω από τον Ήλιο η ένταση της ακτινοβολίας που φτάνει στη Γη μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους
- Επειδή η απόσταση Γης-Ηλίου μεταβάλλεται (περιήλιο, αφήλιο), η ηλιακή σταθερά μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους, με διακύμανση $\pm 3.4\%$ από τη μέση τιμή:

- Η ένταση της ακτινοβολίας μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα του τετραγώνου της απόστασης από τον Ήλιο

$$I = S_o \left(\frac{R_0}{R} \right)^2$$

$$R = 1 - 0.01672 \sin[0.9856(D - 4)] \text{ σε AU}$$

Όπου $D = 1, 2, 3, \dots 365 / 366$
ο αριθμός της ημέρας του έτους



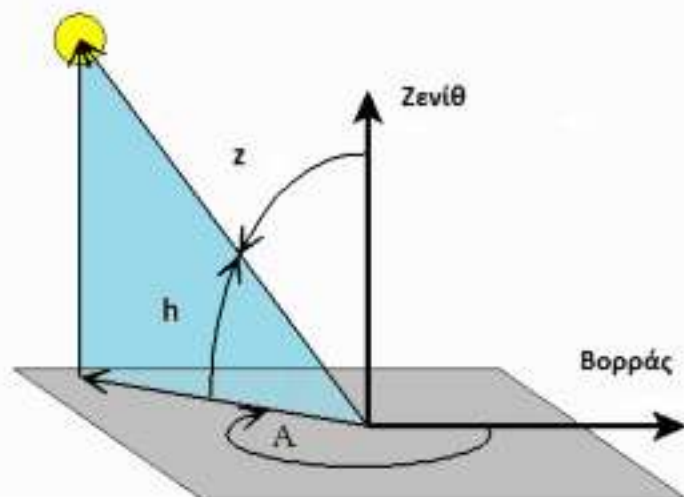
Πηγή: <https://en.wikipedia.org/wiki/Equinox>

- Στην καθημερινή πρακτική θεωρούμε την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σταθερή & ίση με I_0

□ Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης σ' έναν τόπο, μια ορισμένη χρονική στιγμή εξαρτάται:

- ✓ Από την ηλιακή δραστηριότητα, η οποία επηρεάζει την τιμή της ηλιακής σταθεράς
- ✓ Από την απόσταση Γης – Ηλίου
- ✓ Το ύψος του Ηλίου πάνω από τον ορίζοντα του τόπου
- ✓ Από το γεωγραφικό πλάτος
- ✓ Από την εποχή του έτους
- ✓ Από την ώρα της ημέρας
- ✓ Από την διαδρομή της ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα

- Το ύψος του Ηλίου (ηλιακή γωνία-solar angle) πάνω από τον ορίζοντα (η γωνία μεταξύ των ακτίνων του ηλίου και του ορίζοντα σ' έναν τόπο)



Η ένταση (I) της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια ισούται:

$$I = I_{\max} \cos z$$

ή

$$I = I_{\max} \eta \mu h$$



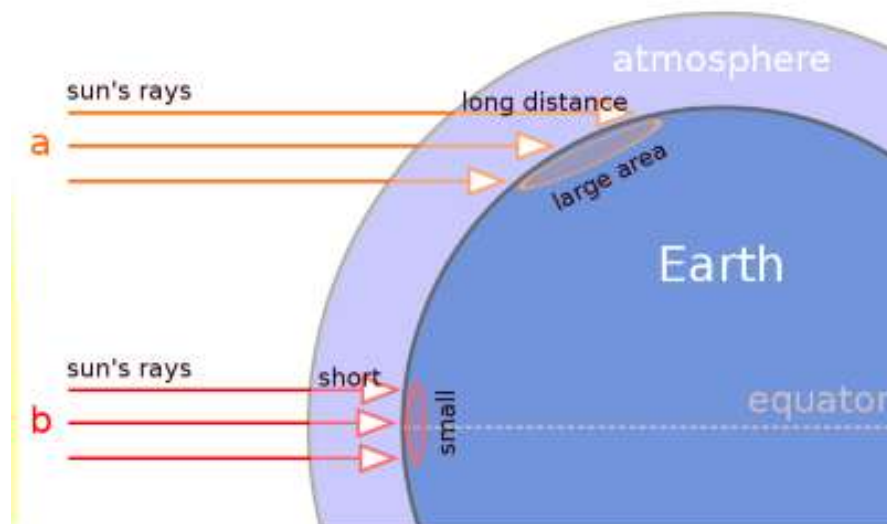
Η ένταση, I , της ηλιακής ακτινοβολίας μεταβάλλεται με το ύψος του Ηλίου (νόμος **Lambert** ή νόμος των ημιτόνων)

$I_{\max}$, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που πέφτει κάθετα σε μια οριζόντια επιφάνεια
 z , η ζενιθία γωνία του ηλίου (η γωνία μεταξύ της πρόσπτωσης και της καθέτου στην επιφάνεια)

h , το ύψος του ηλίου ή ηλιακή γωνία (η γωνία μεταξύ της πρόσπτωσης και της επιφάνειας)

A , αζιμούθιο

- Όσο μικρότερο είναι το ύψος ηλίου (h) τόσο λιγότερη ενέργεια ακτινοβολίας θα μοιράζεται στην επιφάνεια & επομένως τόσο μικρότερη θα είναι η ένταση της ακτινοβολίας



Πηγή: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oblique_rays.svg

$$I = I_{\max} \sigma \nu \nu Z \quad \eta$$

$$I = I_{\max} \eta \mu h$$

Όπου: $\sigma \nu \nu Z = \eta \mu \phi \cdot \eta \mu \delta + \sigma \nu \nu \phi \cdot \sigma \nu \nu \delta \cdot \sigma \nu \nu \omega$

$$h = 90 - \phi \pm \delta \quad \text{Όπου:}$$

ϕ το γεωγραφικό πλάτος

δ η απόκλιση του Ηλίου (declination)

το γεωγραφικό πλάτος του τόπου όπου εκείνη την στιγμή (ημέρα) ο ήλιος το μεσημέρι μεσουρανή ακριβώς στο κέντρο του ουράνιου θόλου & οι ακτίνες του πέφτουν κάθετα

$\delta = 0$ Ισημερίες

$\delta > 0$ όταν το γεωγραφικό πλάτος του παρατηρητή και το πλάτος απόκλισης είναι στο ίδιο ημισφαίριο (Β. Ημισφαίριο)

$\delta < 0$ όταν το γεωγραφικό πλάτος του παρατηρητή και το πλάτος απόκλισης είναι σε αντίθετα ημισφαίρια (Ν. Ημισφαίριο)

ω η ωριαία γωνία

$\omega = 0$ μεσημβρία

$\omega < 0$ προ μεσημβρίας

$\omega > 0$ μετά μεσημβρίας

Πηγή:

<http://www.itacanet.org/the-sun-as-a-source-of-energy/part-1-solar-astronomy/>

Απόκλιση Ηλίου ή πλάτος απόκλισης (**declination latitude**) (δ)

- Επειδή οι ακτίνες του Ηλίου που φτάνουν στην επιφάνεια της Γης είναι παράλληλες μεταξύ τους & σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η Γη είναι σφαιρική => αυτές προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια της Γης μόνο σε ένα σημείο της
- Στην περιοχή που συμβαίνει αυτό, ο ήλιος κατά την αληθή μεσημβρία μεσουρανά ακριβώς στο κέντρο του ουράνιου θόλου. Το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής αυτής καλείται **πλάτος απόκλισης**
- Το **πλάτος απόκλισης** κυμαίνεται $\pm 23.5^\circ$ γύρω από τον Ισημερινό

(δ)

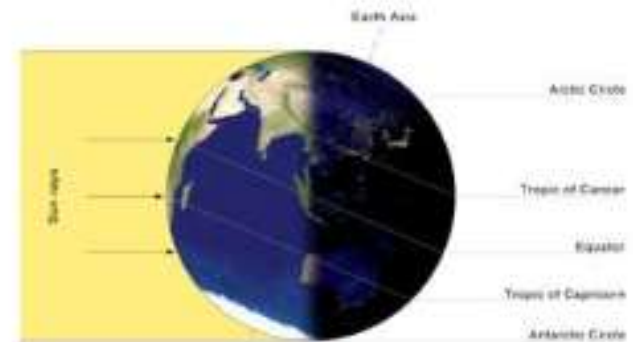
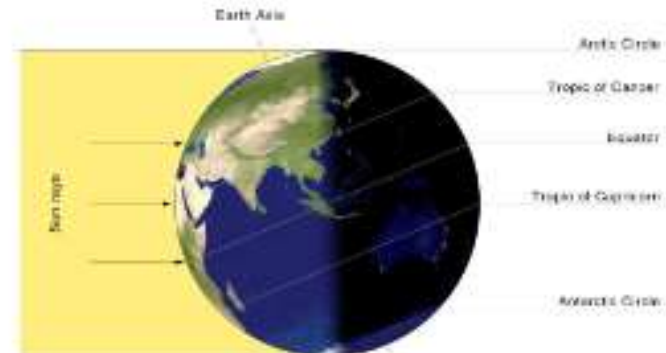
- Το **πλάτος απόκλισης** είναι **0°** (οι ακτίνες πέφτουν κάθετα στην περιοχή του ισημερινού κατά τις **Ισημερίες** (21 Μαρτίου & 21 Σεπτεμβρίου))

- Κατά το **θερινό ηλιοστάσιο** (21 Ιουνίου) οι ακτίνες πέφτουν κάθετα στην περιοχή του **Τροπικού του Καρκίνου** (**23.5° Βόρεια**)

- Κατά το **χειμερινό ηλιοστάσιο** (21 Δεκεμβρίου) οι ακτίνες πέφτουν κάθετα στην περιοχή του **Τροπικού του Αιγόκερου** (**23.5° Νότια**)



Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/September_equinox



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

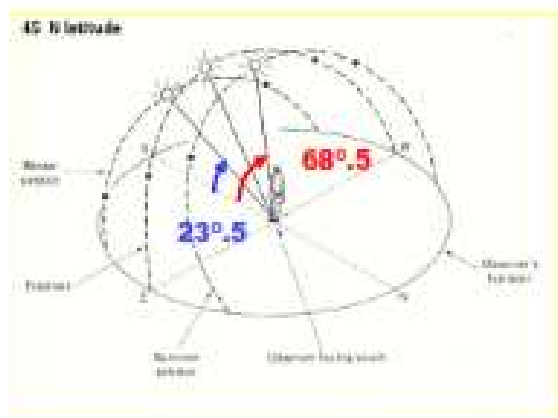
Το ύψος Ηλίου (h), η Ζενιθία γωνία και επομένως η ένταση της ακτινοβολίας εξαρτώνται από



Ώρα της ημέρας

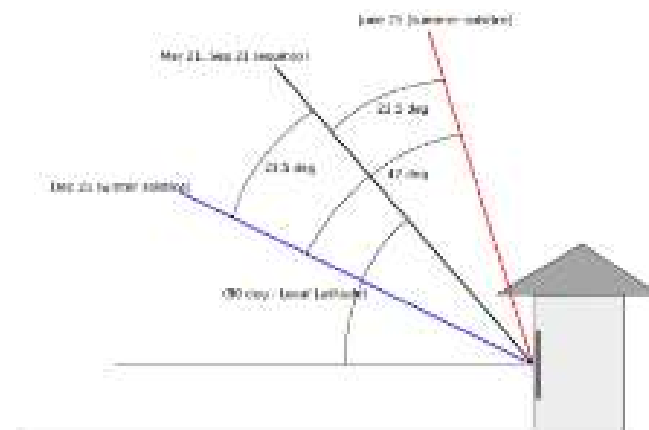
Εποχή του έτους

Γεωγραφικό πλάτος

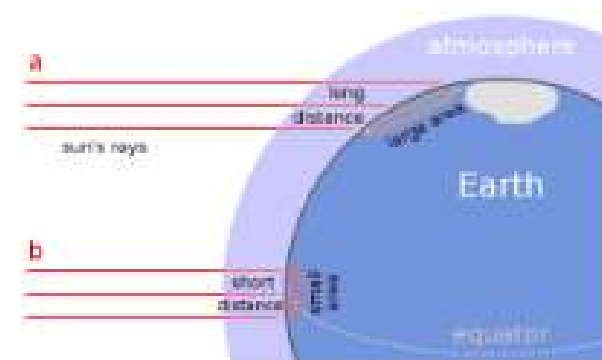


Πηγή:

http://solarwiki.uodavis.edu/The_Science_of_Solar/Solar_Basics/B_Basics_of_the_Sun/VI_The_Sun%27s_Motion



Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Sun_path



Πηγή:

https://en.wikipedia.org/wiki/Effect_of_sun_angle_on_climate

Εποχή του έτους

Ισημερίες

21 Μαρτίου

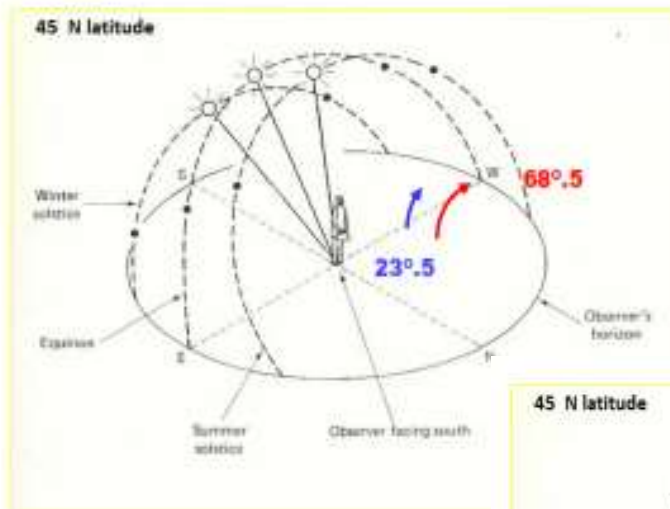
21 Σεπτεμβρίου

Θερινό ηλιοστάσιο

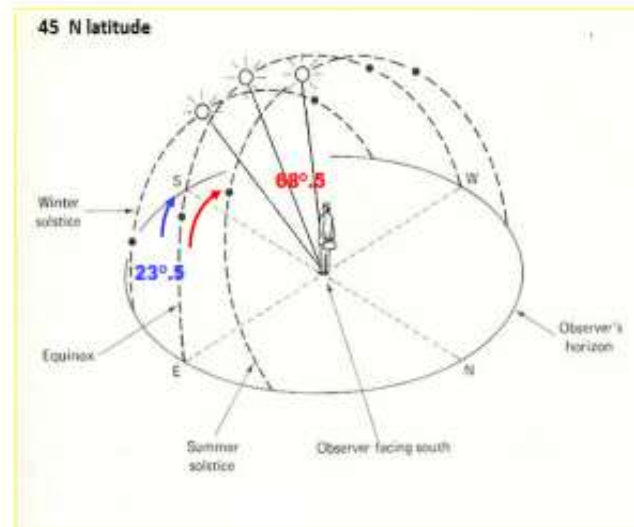
21 Ιουνίου

Χειμερινό ηλιοστάσιο

21 Δεκεμβρίου



Στα μέσα γεωγραφικά πλάτη (45°)
η ένταση της ακτινοβολίας μειώνεται μεταξύ
θερινού και χειμερινού ηλιοστασίου από
93 σε 38 %

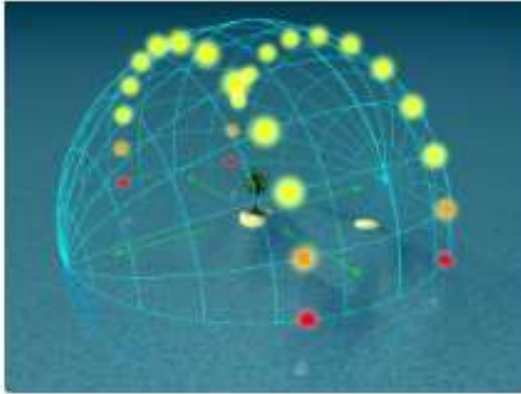


Στα μέσα γεωγραφικά πλάτη (40°)
η ένταση της ακτινοβολίας μειώνεται από
96% (θερινό ηλιοστάσιο) σε **45%**
(χειμερινό ηλιοστάσιο)

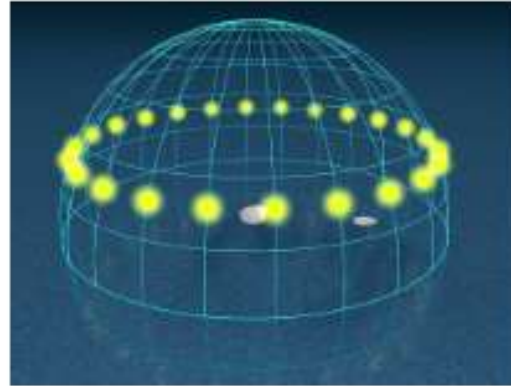
Πηγή:

http://solarwiki.ucdavis.edu/The_Science_of_Solar/Solar_Basics/B_Basics_of_the_Sun/V1_The_Sun%27s_Motion

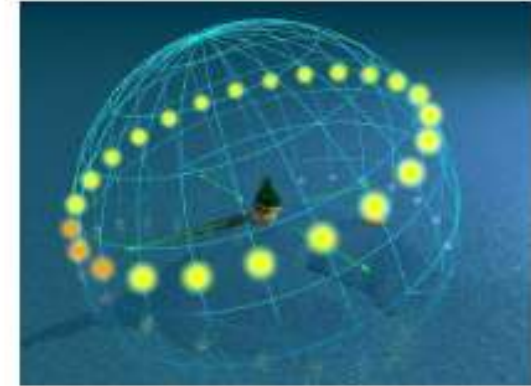
Ισημερινός



Β. Πόλος



Αρκτικός κύκλος

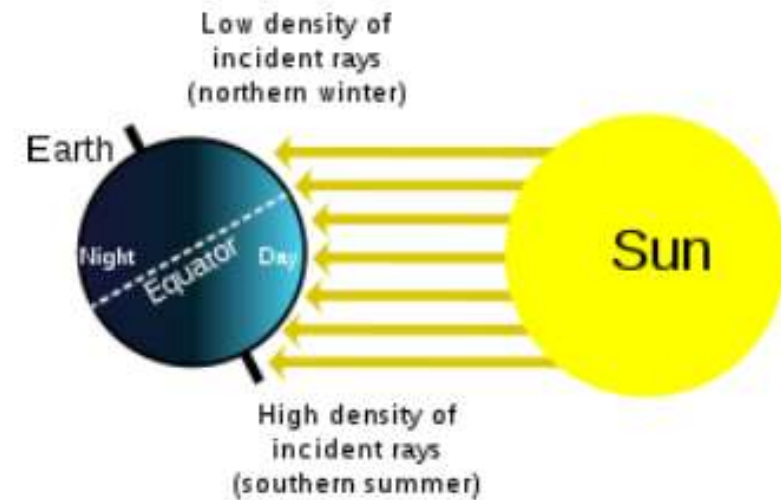


Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Sun_path

Στον Ισημερινό η ένταση της ακτινοβολίας μειώνεται μεταξύ θερινού και χειμερινού ηλιοστασίου μειώνεται κατά **8 %**

Γεωγραφικό πλάτος

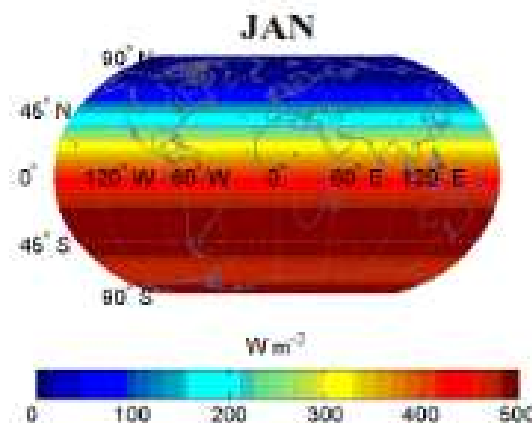
Λόγω της σφαιρικότητας (καμπυλότητας) της Γης το ύψος ηλίου και επομένως και η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας μειώνονται με το γεωγραφικό πλάτος



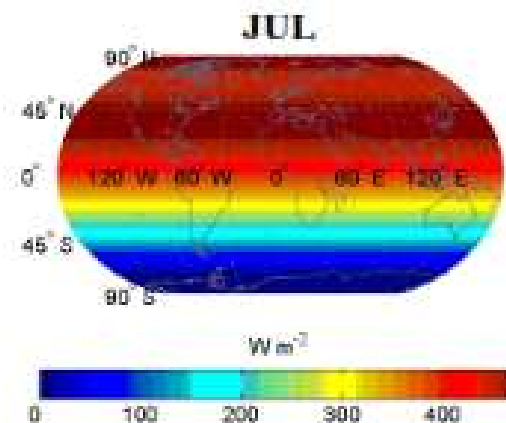
Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Effect_of_sun_angle_on_climate

- Γεωγραφική κατανομή της Ηλιακής Ακτινοβολίας που φτάνει στην κορυφή της ατμόσφαιρας
- Ζωνική κατανομή με μέγιστο στον πόλο του ημισφαιρίου με τοπικό καλοκαίρι και σταδιακή ελάττωση καθώς μεταβαίνουμε στο άλλο ημισφαίριο

$$S_o = 1370 \pm 1\% \text{ W/m}^2$$



$$S_o = 1435 \text{ W/m}^2$$



$$S_o = 1335 \text{ W/m}^2$$

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

Το ολικό Ποσό Ηλιακής Ακτινοβολίας ($Q_{ολ}$) που φτάνει στην κορυφή της Ατμόσφαιρας σε μια επίπεδη επιφάνεια σ' έναν τόπο γεωγραφικού πλάτους φ , από την ανατολή του ηλίου μέχρι τη δύση μια συγκεκριμένη ημερομηνία είναι

$$\begin{aligned} \longrightarrow Q_{ολ} &= \int_{\text{ανατολή Ηλίου}}^{\text{δύση Ηλίου}} I_k \sin Z \cdot dt \\ \longrightarrow Q_{ολ} &= I_k \int_{t_a}^{t_d} (\eta \mu \varphi \cdot \eta \mu \delta + \sin \varphi \cdot \sin \delta \cdot \sin H) \cdot dt \end{aligned}$$

H : η ωριαία γωνία

Γωνιακή ταχύτητα της Γης: $\Omega = \frac{dH}{dt} = \frac{2\pi}{T}$

$$\longrightarrow Q_{ολ} = \frac{T \cdot I_k}{2\pi} \int_{H_a}^{H_d} (\eta \mu \varphi \cdot \eta \mu \delta + \sin \varphi \cdot \sin \delta \cdot \sin H) \cdot dH$$

ισχύει $\left[\frac{I}{I_0} = \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 \right]$

$$Q_{ολ} = \frac{T \cdot I_0}{\pi} \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 \left[H_\delta \cdot \eta_{μφ} \cdot \eta_{μδ} + \sigma_{νφ} \cdot \sigma_{νδ} \cdot \eta_{μH_\delta} \right]$$

H_δ η ωριαία γωνία δύσης

διάρκεια ημέρας σε λεπτά (24 ώρες x 60 λεπτά)

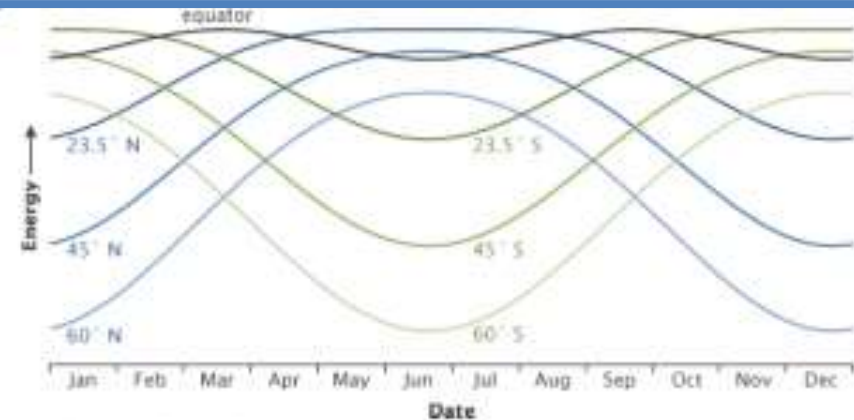
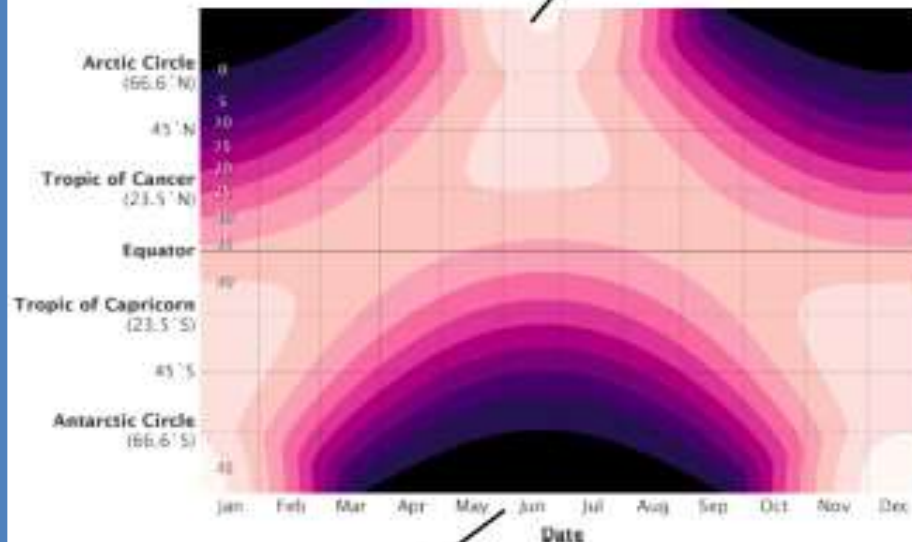


$$Q_{ολ} = \frac{1440 \cdot I_0}{\pi} \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 (H_\delta \cdot \eta_{μφ} \cdot \eta_{μδ} + \sigma_{νφ} \cdot \sigma_{νδ} \cdot \eta_{μH_\delta}) \text{ ly/day}$$

ηλιακή σταθερά εκπεφρασμένη σε ly/min

$$1 \text{ ly/day} = 0.48 \text{ Wm}^{-2}$$

Πολική μέρα



Πηγή: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/EnergyBalance/page3.php>

Πηγή: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/EnergyBalance/page3.php>

Πολική νύχτα

Μεγάλα γεωγραφικά (πολικά) πλάτη: Πολύ μεγάλες μεταβολές (αυξομειώσεις) της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του έτους αλλά, μικρές μεταβολές του κλίματος

Μέσα γεωγραφικά (εύκρατα) πλάτη: Μεγάλες μεταβολές (αυξομειώσεις) της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του έτους και σημαντικές τροποποιήσεις του κλίματος μέσα στο έτος

Μικρά γεωγραφικά (τροπικά) πλάτη: Μικρές μεταβολές (αυξομειώσεις) της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του έτους αλλά μικρές μεταβολές του κλίματος μέσα στο έτος

Η συγκεκριμένη εικόνα δεν ισχύει για την επιφάνεια της Γης καθώς η ακτινοβολίας κατά τη διέλευση της μέσα από τη γήινη ατμόσφαιρα εν μέρει ανακλάται, απορροφάται και σκεδάζει

✓ Από την διαδρομή της ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα

- Η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διέλευση της μέσα από τη γήινη ατμόσφαιρα **εξασθενεί** λόγω τριών διαδικασιών:
 - 1) της **ανάκλασης** από τα νέφη και τα αιωρούμενα σωματίδια
 - 2) της '**σκέδασης – διάχυσης**' από τα μόρια των αερίων της Ατμόσφαιρας & των αιωρούμενων σωματιδίων
 - 3) της **απορρόφησης** από διάφορα αέρια της ατμόσφαιρας & αιωρούμενα σωματίδια
- Η εξασθένιση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα περιγράφεται από τον **νόμο Beer Lambert**:

$$I_{\lambda} = I_{o\lambda} e^{-\tau_{\lambda} m}$$

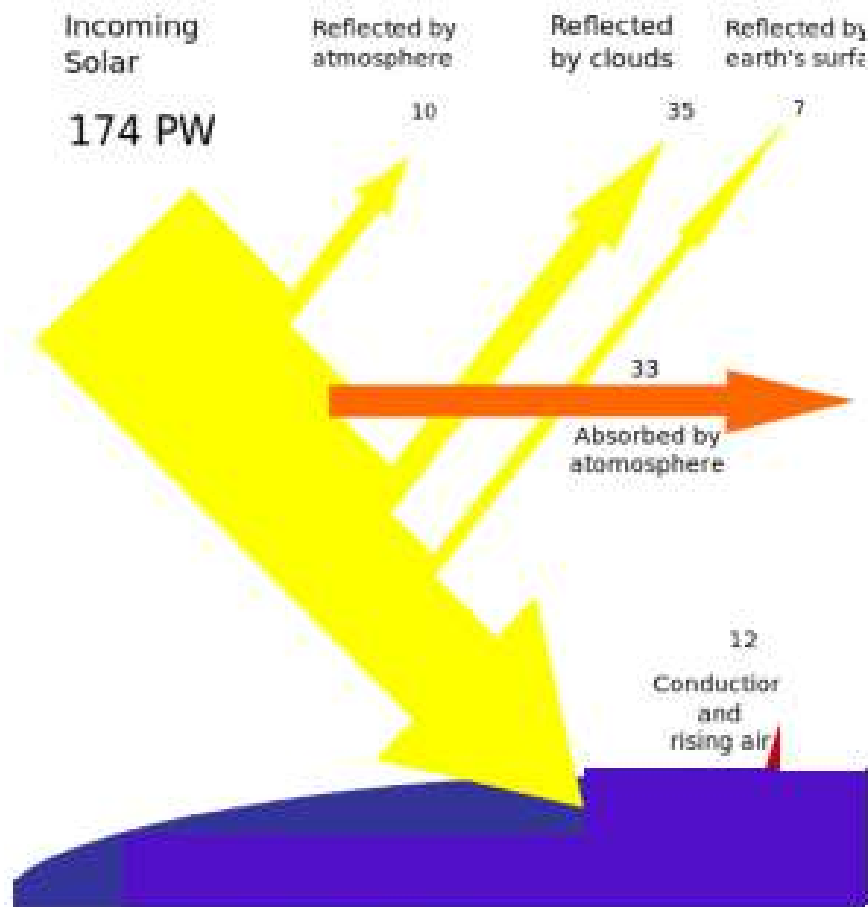
Όπου:

I_{λ} = η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μετά την εξασθένιση της μέσα στην ατμόσφαιρα

$I_{o\lambda}$ = η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας πριν εισέλθει στην ατμόσφαιρα

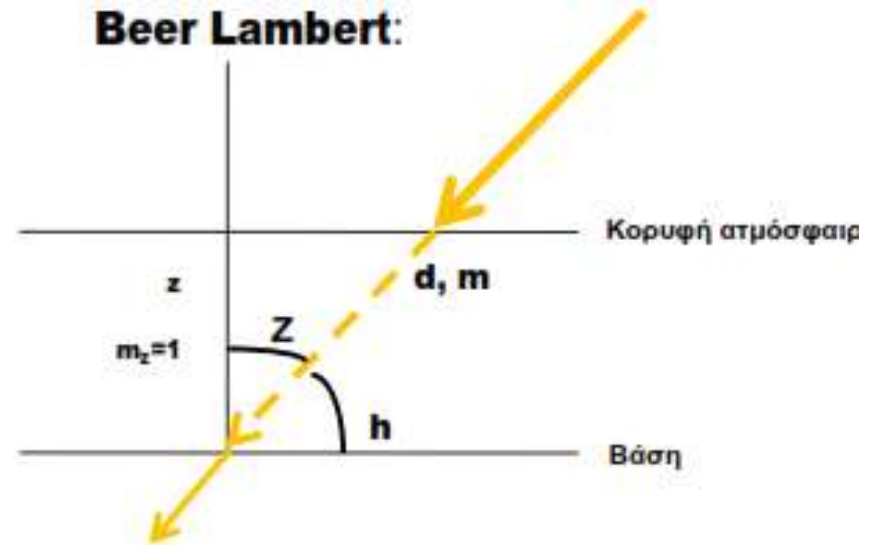
τ_{λ} = το οπτικό βάθος

m = σχετική μάζα του αέρα και δείχνει πόσες φορές η μάζα του αέρα που διατρέχει η ακτινοβολία με πλάγια πρόσπτωση είναι μεγαλύτερη από εκείνη με κάθετη πρόσπτωση



Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_energy

Beer Lambert:



$$I = I_o e^{-b_{ext}d} = I_o e^{-\frac{\tau}{\sigma \nu Z}} = I_o e^{-\frac{\tau}{\eta \mu h}}$$

Όπου:

d = η απόσταση που διανύει η ηλιακή ακτινοβολία μέσα στην ατμόσφαιρα

z = κατακόρυφη απόσταση (ζενίθ)

Z = η ζενιθία γωνία

h = το ύψος ηλίου

b_{ext} = ο συνολικός συντελεστής εξασθένησης

τ = το οπτικό βάθος ή πάχος

Το οπτικό βάθος τ εξαρτάται:

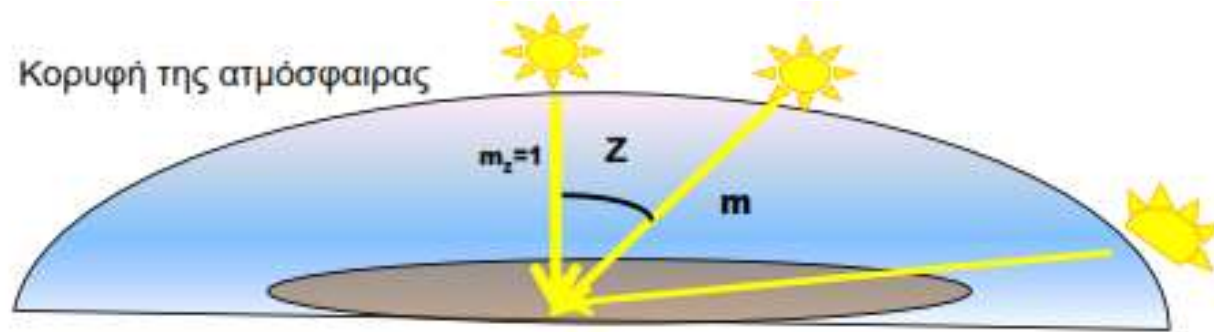
- Από τις ιδιότητες εξασθένισης του ατμοσφαιρικού στρώματος
- Το γεωμετρικό πάχος του στρώματος

$$\tau = \tau_{\text{scat}} + \tau_{\text{abs}}$$

Συνολικό οπτικό βάθος σκέδασης Συνολικό οπτικό βάθος απορρόφησης

$$\tau = \tau_{\text{νέφους}} + \tau_{\text{H}_2\text{O}} + \tau_{\text{CO}_2} + \tau_{\text{O}_3} + \tau_{\text{aerosols}} + \dots$$

Για κάθε συστατικό θεωρούμε το οπτικό βάθος σκέδασης και απορρόφησης



Η εξασθένιση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διέλευση της μέσα στην ατμόσφαιρα εκτός από τις ιδιότητες εξασθένισης του στρώματος εξαρτάται από το γεωμετρικό πάχος του ατμοσφαιρικού στρώματος που αυτή διασχίζει

Εισήχθη έτσι ο όρος της αέριας μάζας **m**

m = 1 κατά την κατακόρυφο (ζενίθ) $\Rightarrow$ **m_z = 1**

Για οποιαδήποτε άλλη διεύθυνση πρόσπτωσης η αέρια μάζα που διασχίζει η ακτινοβολία συμβολίζεται με **m** και συνδέεται με τη **m_z**

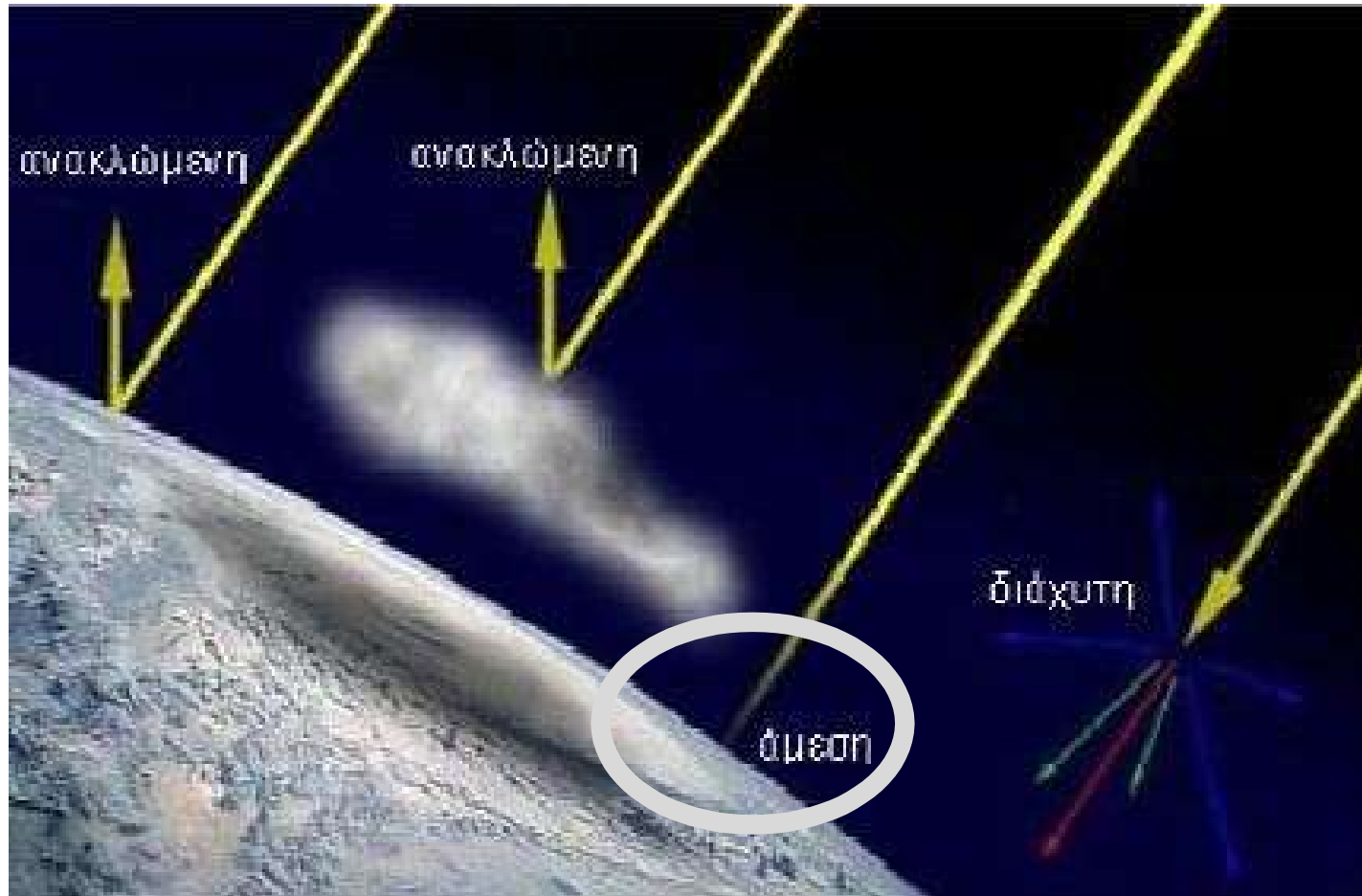
$$\left. \begin{array}{l} m = m_z / \sigma \nu Z \\ m_z = 1 \end{array} \right\} m = \frac{1}{\sigma \nu Z} = \frac{1}{\eta \mu h}$$

Z = ζενιθία γωνία
h = ύψος ηλίου

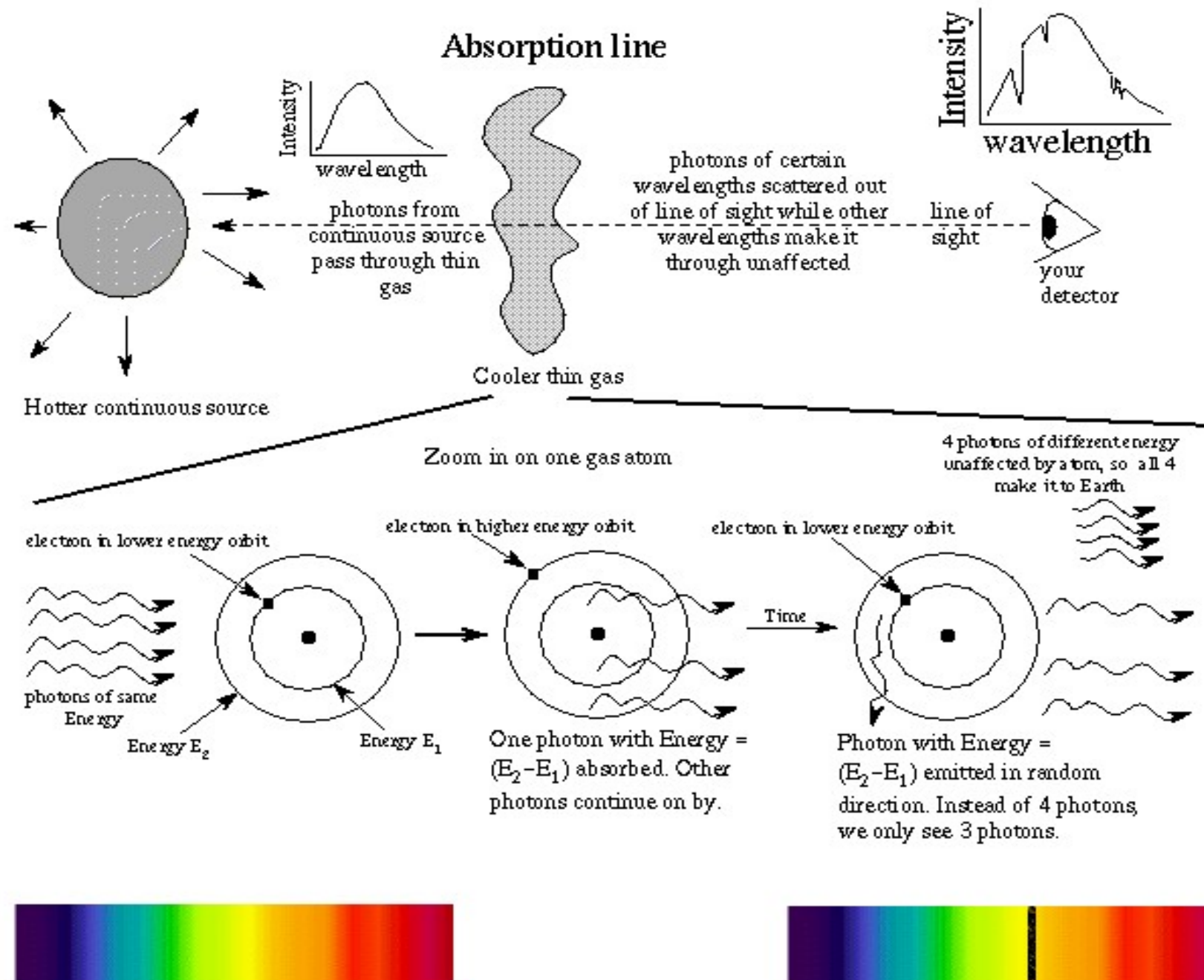
Γωνία πρόσπτωσης (°)	Αέρια μάζα
90	1
60	1.15
30	2
10	5.7
5	10.8

- Πώς διαδίδεται η ακτινοβολία μέσα στην ατμόσφαιρα

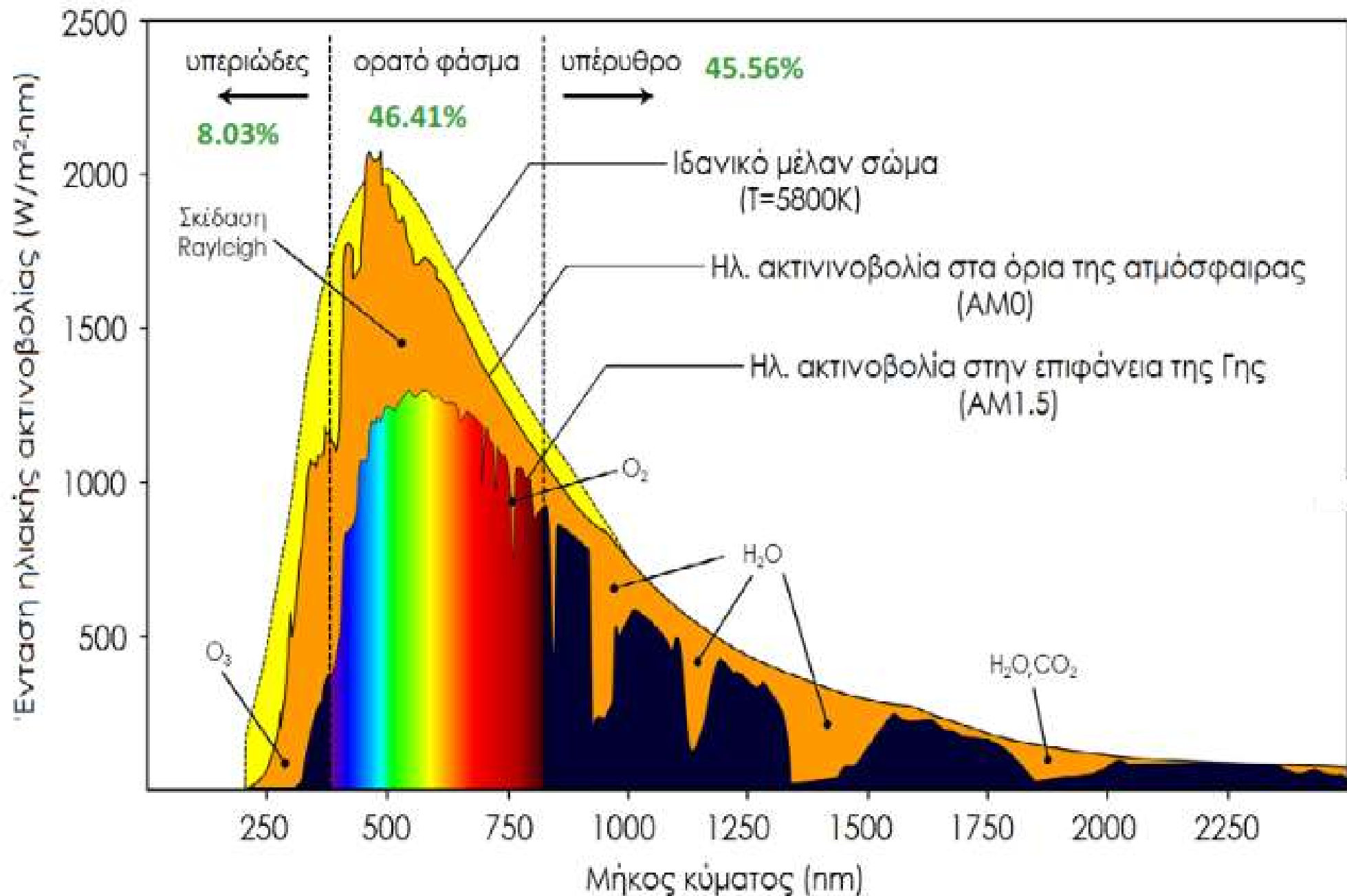
Η ακτινοβολία αλληλεπιδρά με την ατμόσφαιρα



«Άμεση»:Η ακτινοβολία απορροφάται



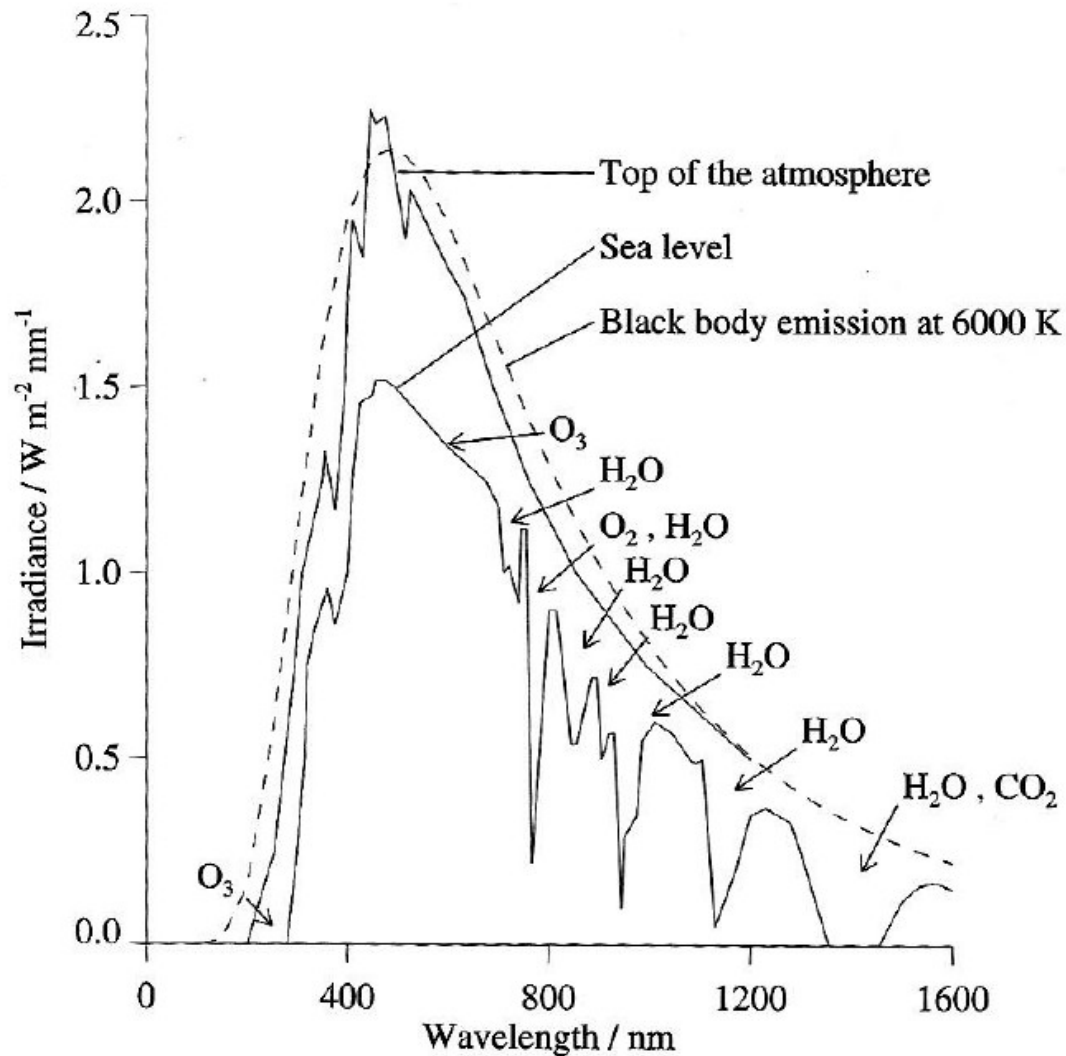
«Άμεση»:Η ακτινοβολία απορροφάται



Η ακτινοβολία απορροφάται από τον ατμοσφαιρικό αέρα

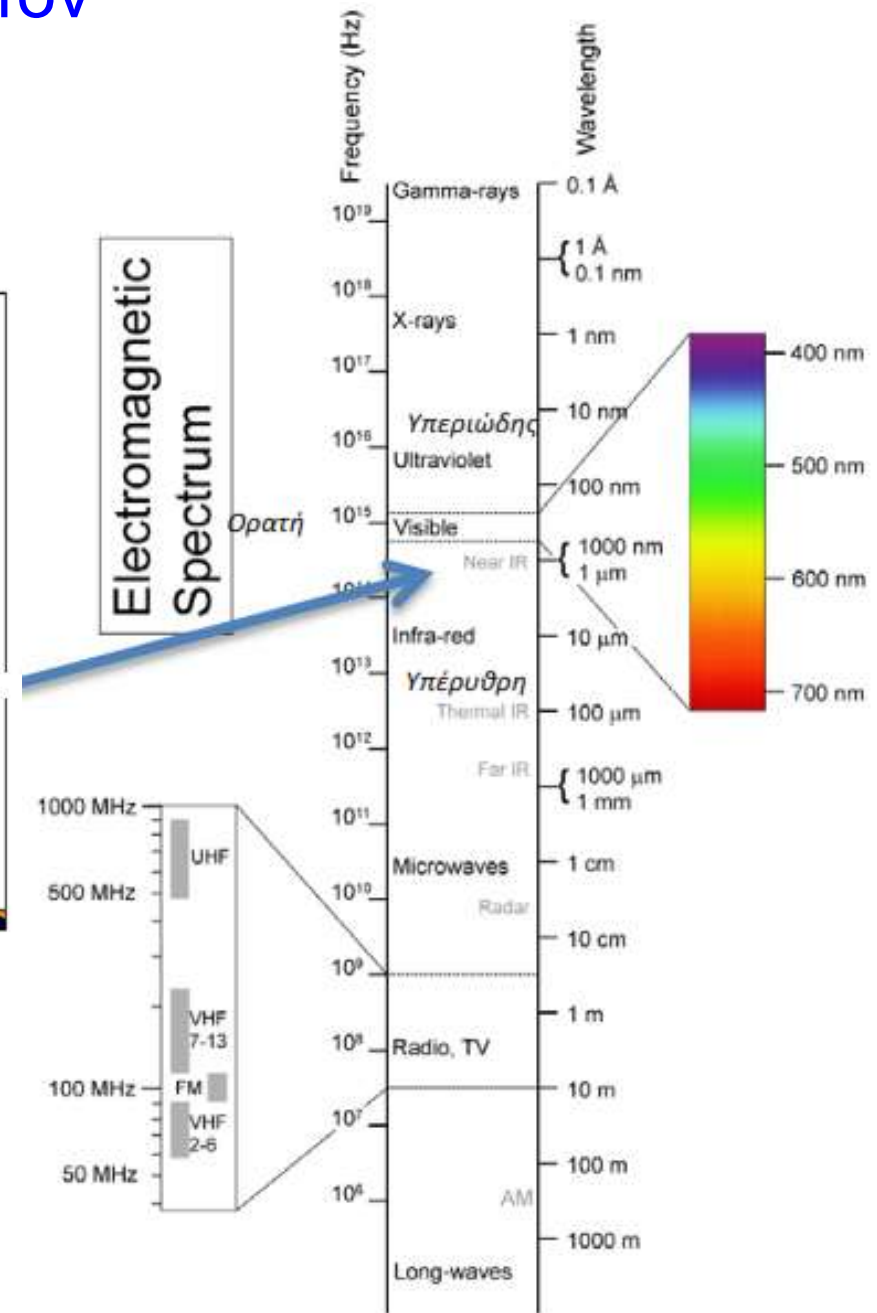
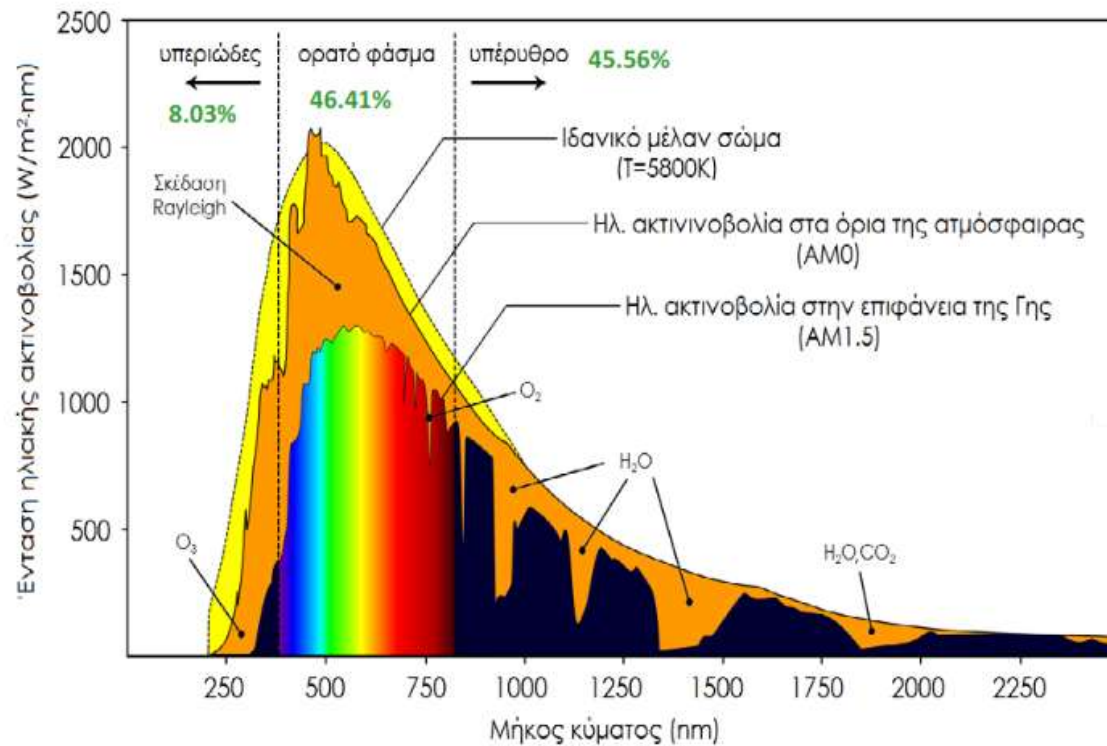
Στο σχήμα παρουσιάζεται η ισχύς στην κορυφή της ατμόσφαιρας

... στην επιφάνεια της θάλασσας και οι απορροφήσεις και σκεδάσεις



Η ακτινοβολία αλληλεπιδρά με την ατμόσφαιρα

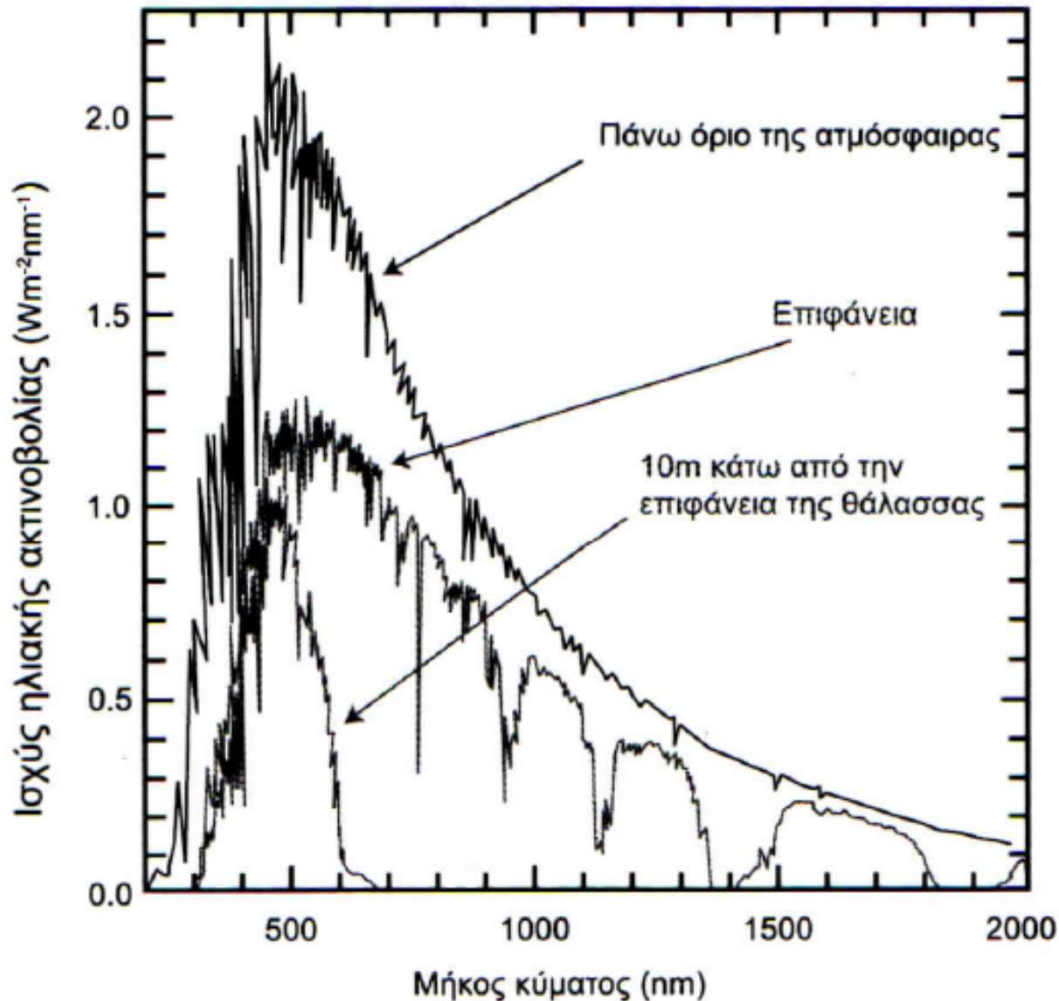
Η ακτινοβολία απορροφάται από τον ατμοσφαιρικό αέρα



Louis E. Keiner - Coastal Carolina University

Η απορρόφηση στο υπέρυθρο

Υπάρχει περιοχή 8~13 μm που ονομάζεται ατμοσφαιρικό παράθυρο, εκεί η απορρόφηση είναι ασθενής, εκτός από τα 9,6 μm που απορροφά το όζον



Οι υδρατμοί απορροφούν στα 6,3 μm και 2,7 μm

Το διοξείδιο του άνθρακα απορροφά στα 15 μm και 4,3 μm

Τα άλλα περίπου καθόλου !!!!

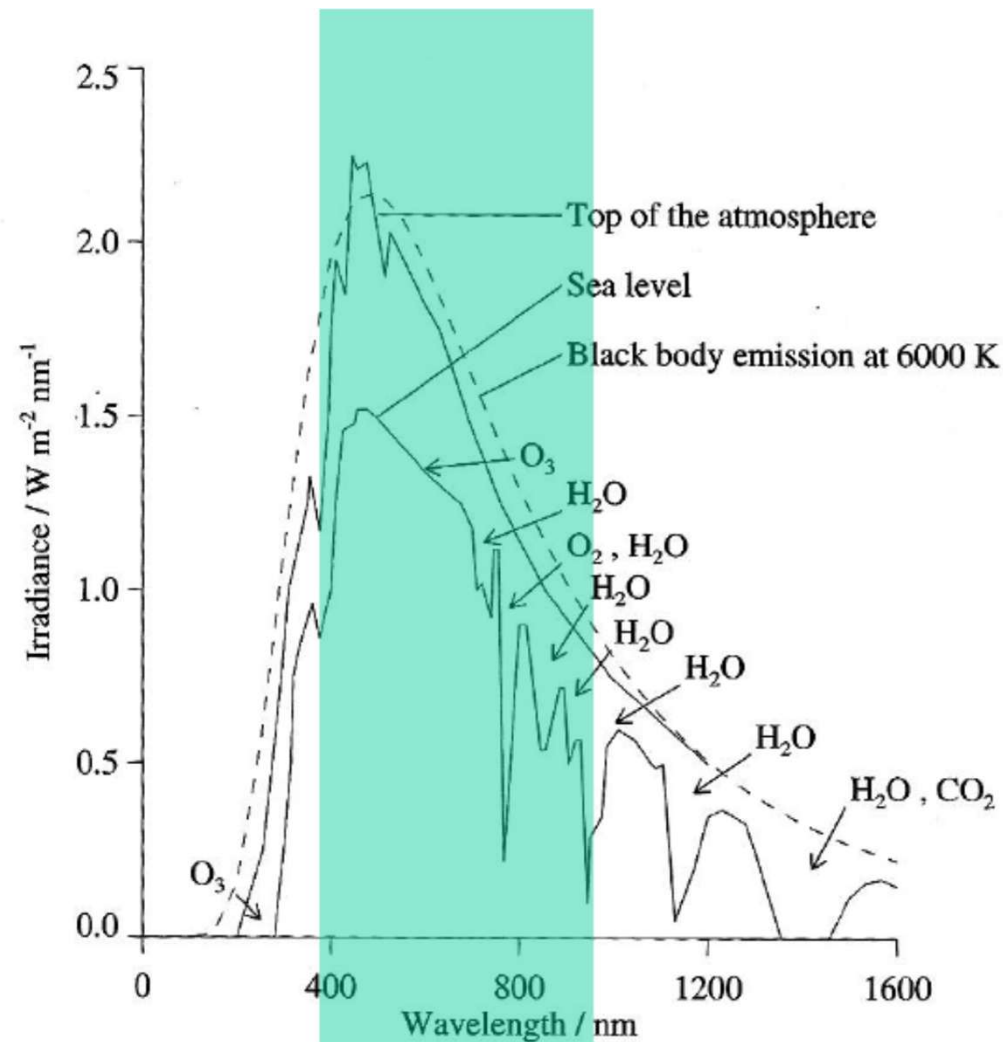
Το μονοξείδιο (CO) απορροφά στα 2,1-2,3 μm και 4,15-4,35 μm

Το **υποξείδιο του αζώτου (N_2O)** απορροφά στα 2,1-2,8 μm και 3,3-3,5 μm

Το μεθάνιο (CH_4) απορροφά στα 2,5-3,2 μm , 4,0-4,6 μm και 5,85-6,1 μm .

Ενώ το (NO_2) απορροφά 14,4-50 μm

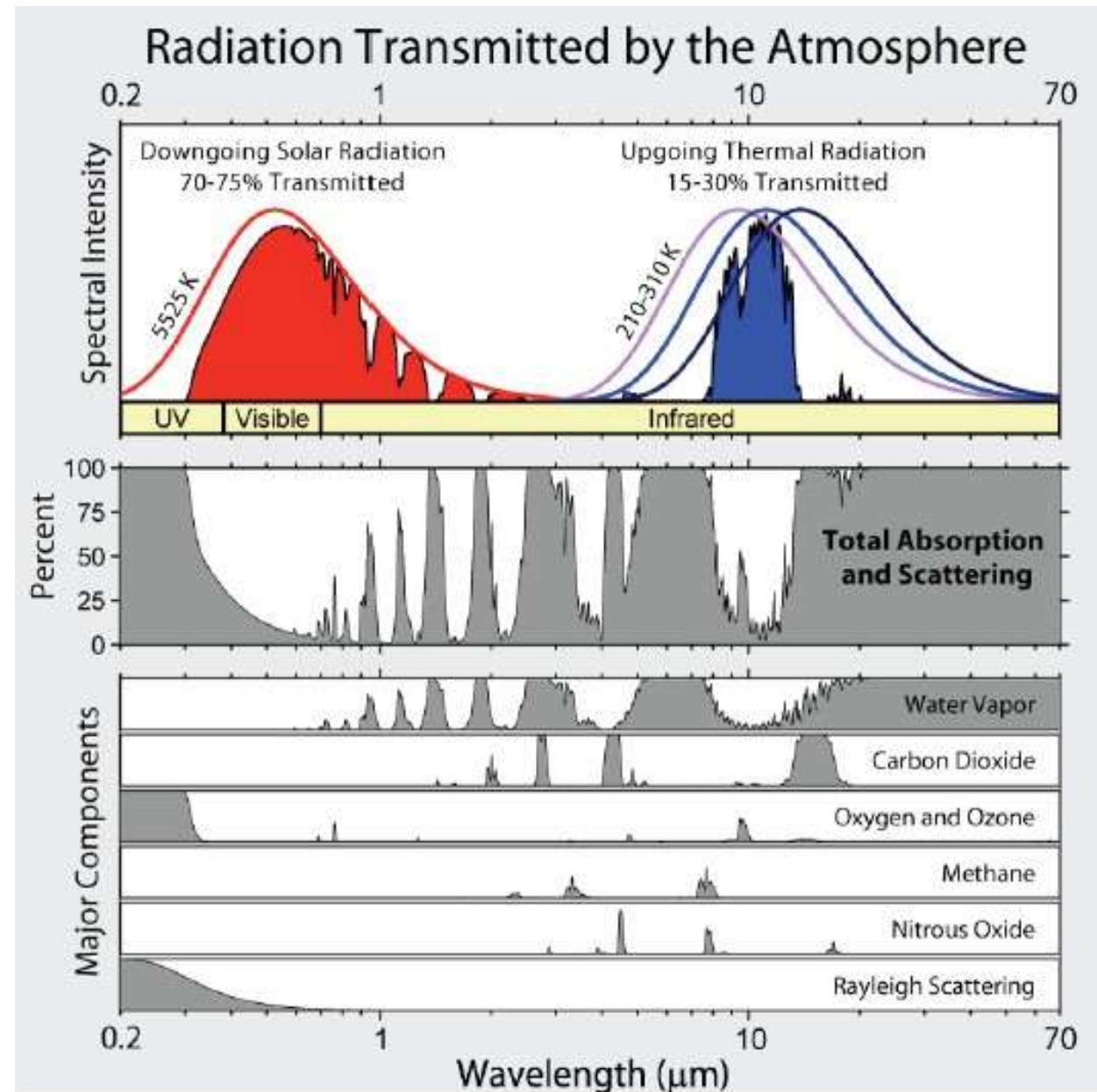
Η ατμόσφαιρα δεν απορροφά στο Ορατό?



20% απορροφάται

Η Γη ακτινοβολεί στο υπέρυθρο...

..... η ατμόσφαιρα όμως απορροφά τα υπέρυθρα μήκη κύματος



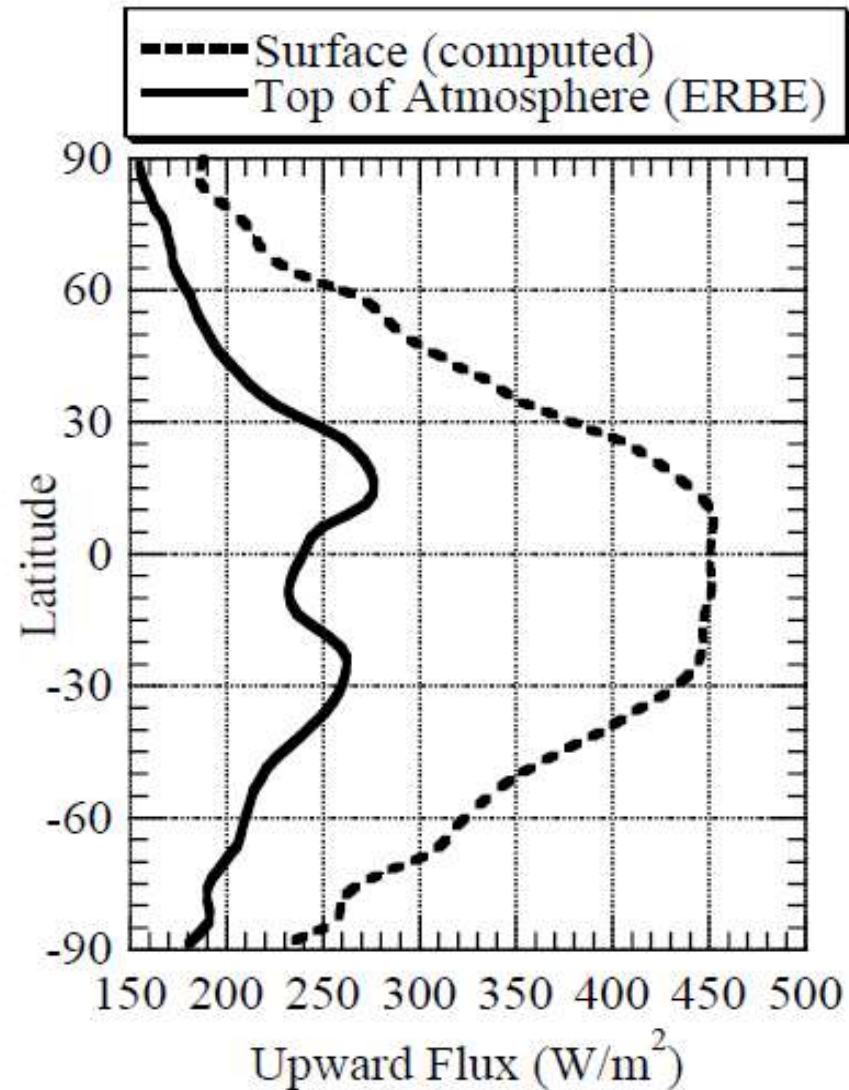
Η ατμόσφαιρα απορροφά περίπου τα 2/3 της ακτινοβολίας στο υπέρυθρο

$$\varepsilon_{\lambda} = 0.6 - 0.8$$

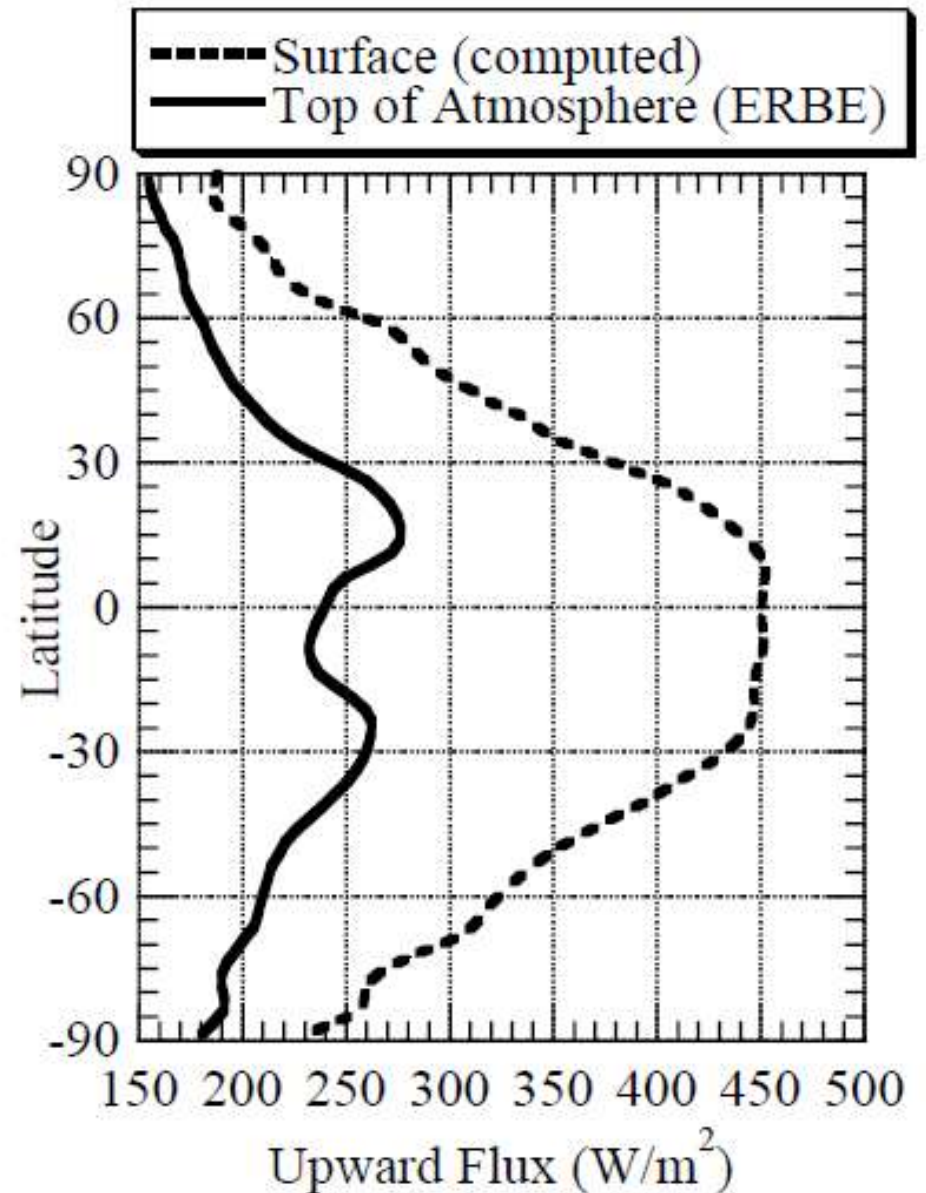
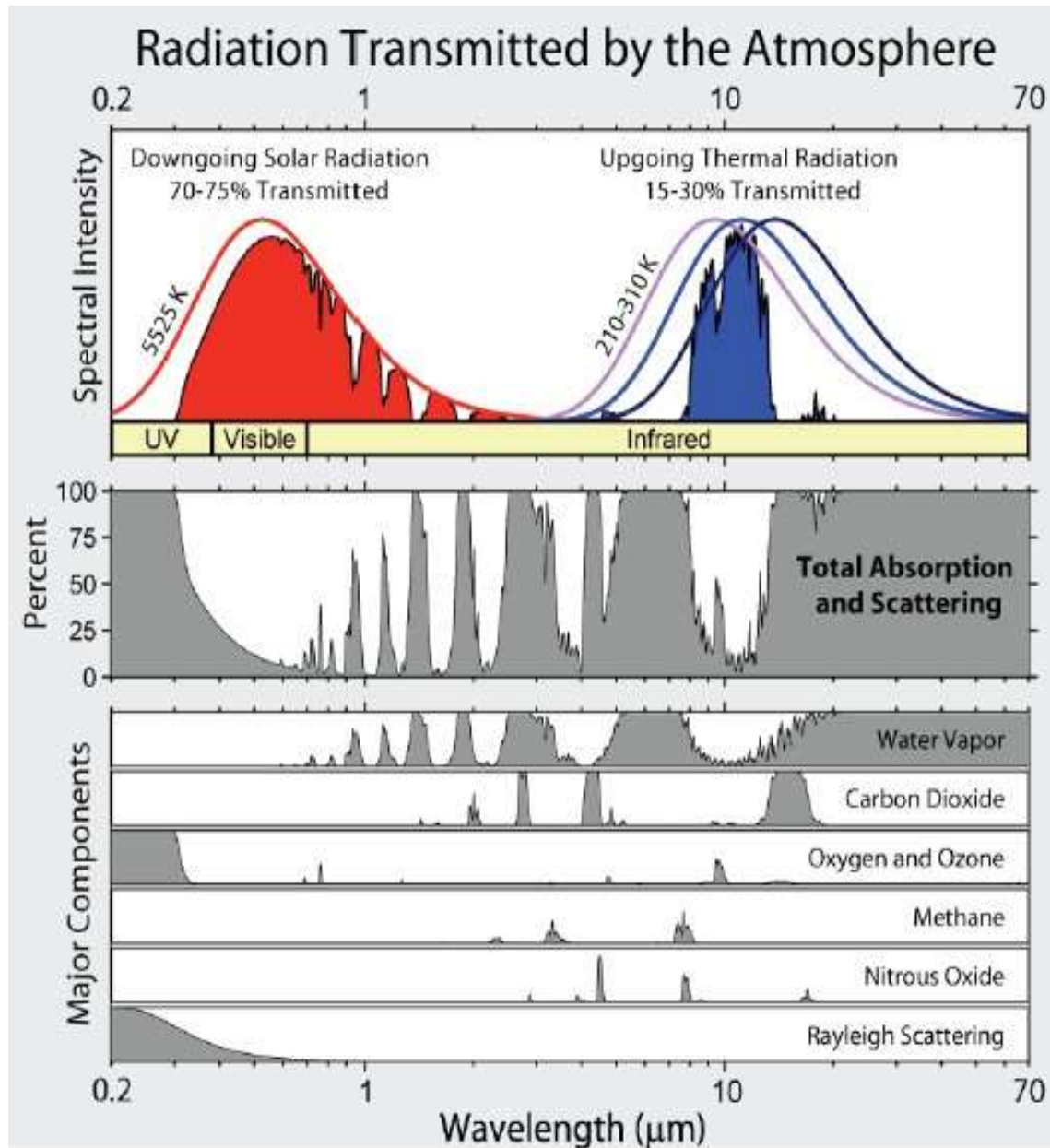
λιγότερο στους πόλους
($T_s = T_e$)

περισσότερο στους
τροπικούς, μέσα πλάτη

Ισημερινός ????

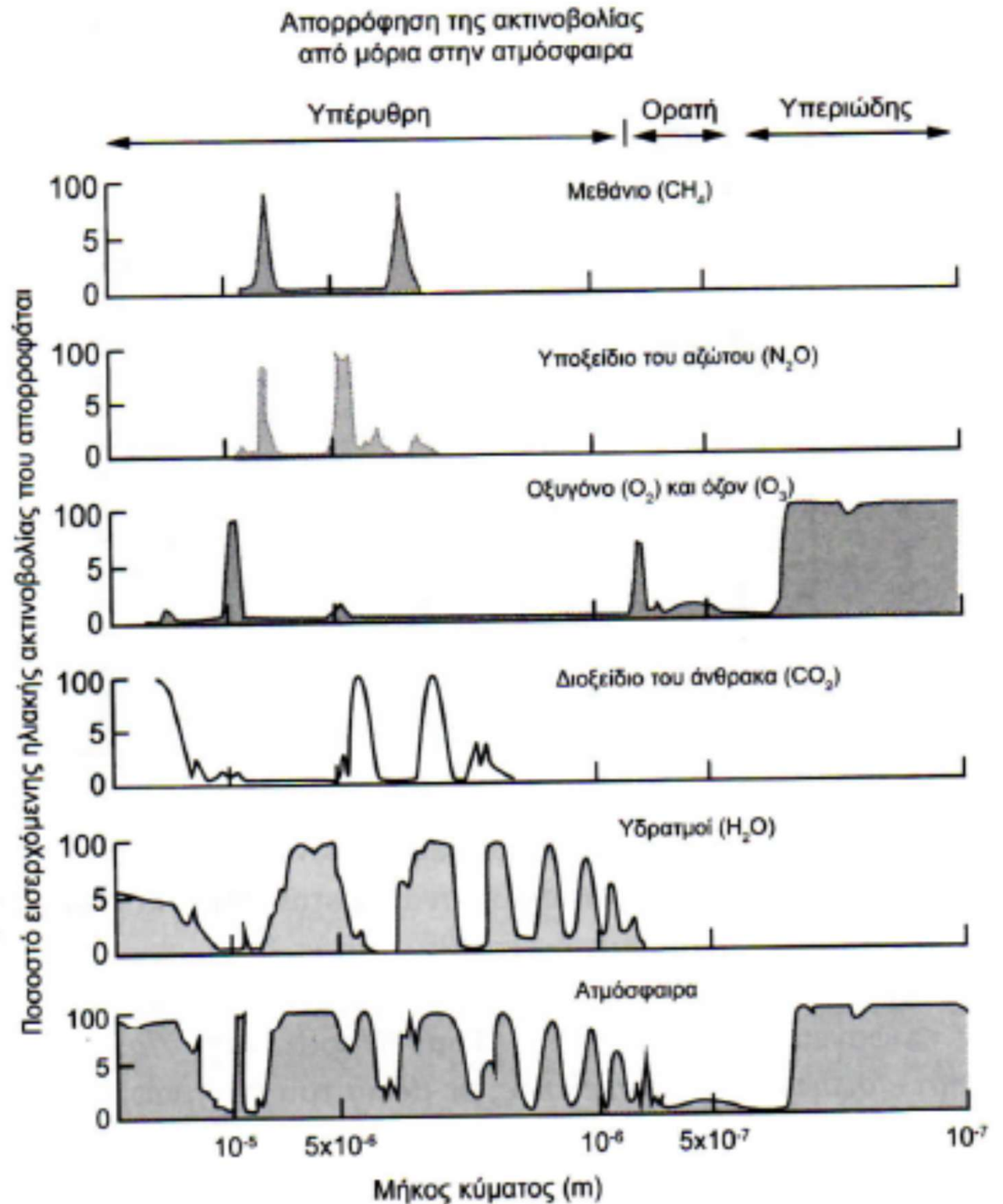


Φαινόμενο Θερμοκηπίου



Σχήμα:

Απορρόφηση στο υπέρυθρο φάσμα από τα έξι ισχυρότερα απορροφώντα αέρια για κάθετη δέσμη που διέρχεται μέσω της ατμόσφαιρας, απουσία νεφών



Η απορρόφηση στο υπεριώδες

Στο υπεριώδες απορροφητές είναι το μοριακό οξυγόνο και το όζον (O_3)

Παρουσιάζεται με τη μορφή της ενεργού διατομής απορρόφησης, δηλαδή το γινόμενο του παράγοντα απορρόφησης επί την μοριακή μάζα

Η ενεργός διατομή για το (O_2) παρουσιάζει μεγάλες τιμές λόγω ιονισμού σε μήκη κύματος μικρότερα από $100\mu m$. Στα $100-130\mu m$ εμφανίζονται ακανόνιστα διαστήματα (άγνωστης προέλευσης), στο $130\sim 200\mu m$ συνεχές φάσμα απορρόφησης κ.λπ.

Η ενεργός διατομή απορρόφησης για το (O_3) παρουσιάζει δυο συνεχή φάσματα – ένα στο υπεριώδες και ένα στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο, λόγω φωτοδιάσπασης $200\sim 310\mu m$, επίσης $310\sim 350\mu m$ και $400\sim 850\mu m$
η τελευταία είναι πιο σημαντική περιοχή

- **Σκέδαση** είναι ένα φυσικό φαινόμενο κατά το οποίο η ηλιακή ακτινοβολία όταν προσπέσει σε μόρια της ατμόσφαιρας αλλάζει διεύθυνση διάδοσης. Μάλιστα,

- κατανέμεται ομοιόμορφα ή ανομοιόμορφα γύρω από αυτά προς όλες ή επιλεγμένες διευθύνσεις

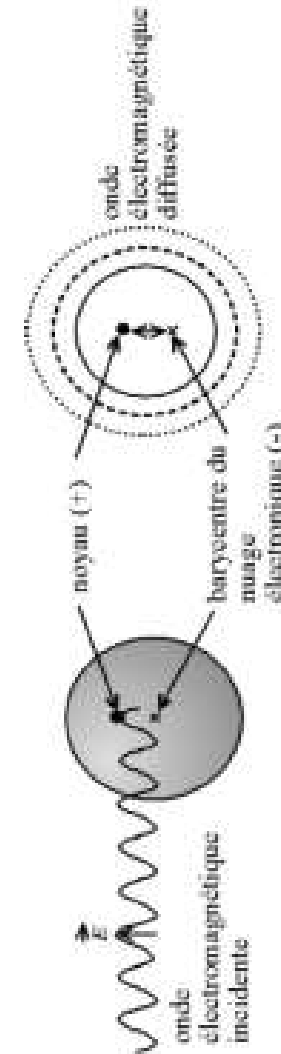
- Η ακτινοβολία που προκύπτει μετά τη σκέδαση λέγεται **διάχυτη ακτινοβολία**

- Εξαρτάται κυρίως από το **μέγεθος** των μορίων της ατμόσφαιρας και το **μήκος κύματος λ** της ακτινοβολίας

- Για μικρού μεγέθους κέντρα σκέδασης (άτομα, μόρια & ιόντα) σκεδάζει κυρίως η μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία (π.χ. μπλε) και καλείται **σκέδαση Rayleigh**

- Για μεγάλου μεγέθους κέντρα σκέδασης (υδροσταγόνες, παγοκρύσταλλοι & αερολύματα) δε σκεδάζει έντονα κάποιο συγκεκριμένο μήκος κύματος (μη επιλεκτική σκέδαση) και καλείται **σκέδαση Mie**

- Για ακόμη μεγαλύτερου μεγέθους σωματίδια η σκέδαση υπόκειται στους νόμους της γεωμετρικής οπτικής



Πηγή: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diffusion_rayleigh.png

σκέδαση

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σκεδάζεται από άτομα και μόρια της ατμόσφαιρας.

Η σκέδαση είναι συνάρτηση των διαστάσεων των σωμάτων που την ανακλούν και του μήκους κύματος.

Ορίζεται συντελεστής α του σκεδάζοντος αερολύματος:

$$\alpha = \frac{2\pi r}{\lambda} = \frac{\pi D}{\lambda}$$

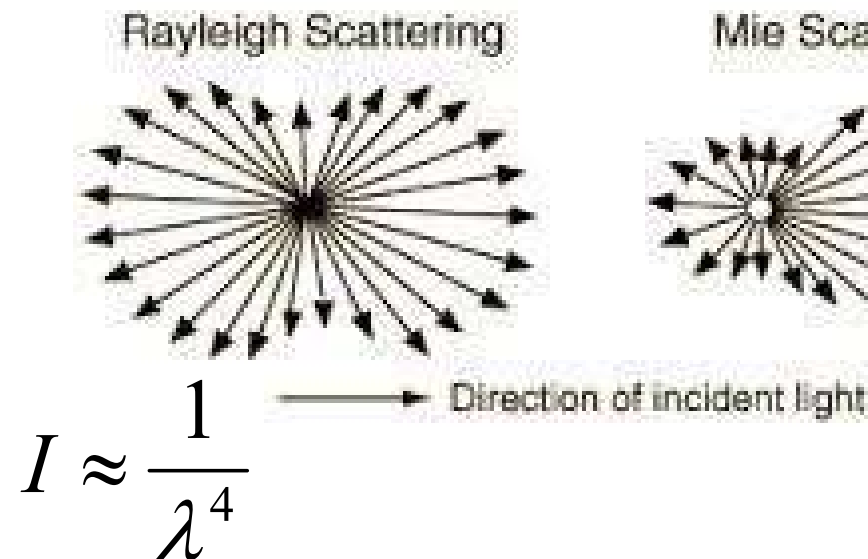
Όπου r η ακτίνα του σκεδάζοντος σωματιδίου, D η διάμετρος του και λ το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Η σκέδαση μπορεί να είναι ελαστική, όταν ο μήκος κύματος της ακτινοβολίας που επανεκπέμπεται διατηρείται σταθερό και μη ελαστική όταν δεν διατηρείται

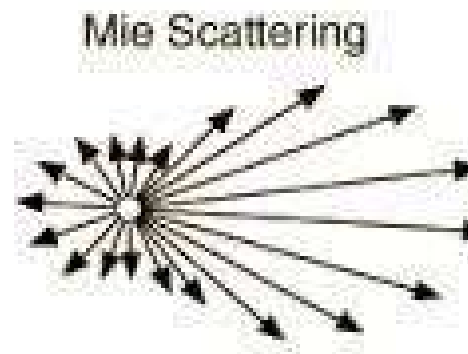
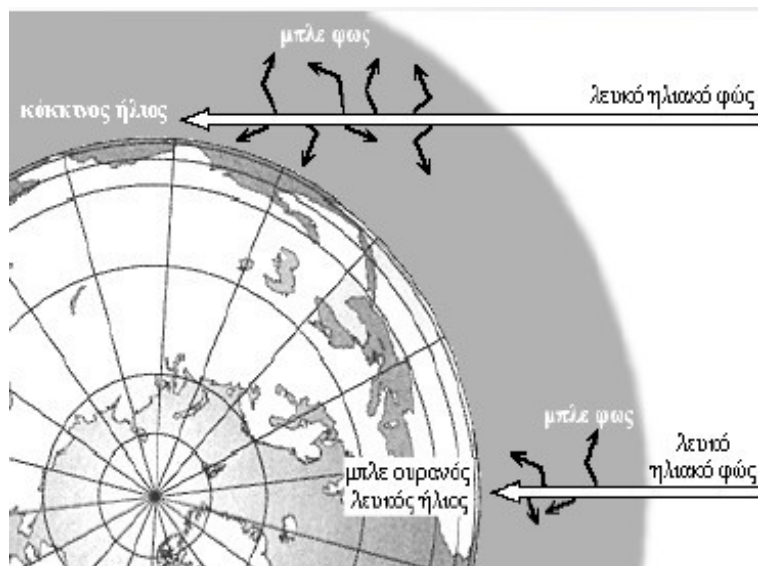
Η κατεύθυνση μπορεί να αλλάζει σε σχέση με την αρχική

Διακρίνονται δύο είδη ελαστικής σκέδασης, η σκέδαση Rayleigh (μοριακή σκέδαση) που λαμβάνει χώρα όταν τα σώματα που σκεδάζουν έχουν διαστάσεις αρκετά μικρότερες από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ($\alpha \leq 1$) (για ορατό μικρότερα του 0,1) η σκέδαση Mie όταν έχουν παρόμοιες διαστάσεις ($\alpha \sim 1$) (μεταξύ 0,01~1) και η σκέδαση Raman, για μόρια N_2 , O_2 , O_3 και H_2O .

«Διάχυτη»: Η ακτινοβολία σκεδάζεται



ο ουρανός είναι μπλε



$$I \approx \frac{1}{\lambda^{1,3}}$$

και τα σύννεφα λευκά



σκέδαση Rayleigh

$$I = I_0 \frac{(1 + \cos^2 \theta)}{2l^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \left(\frac{n^2 + 1}{n^2 - 2} \right)^2 \left(\frac{d}{2} \right)^6$$

Όπου l η απόσταση από το σωματίδιο, θ η γωνία σκέδασης, n ο δείκτης διάθλασης του υλικού της ατμόσφαιρας, d η διάμετρος του σωματιδίου

Η γωνιακή κατανομή ορίζεται από τον όρο $(1 + \cos^2 \theta)$ είναι συμμετρική ως προς το επίπεδο της πρόσπτωσης και έτσι η κατανομή είναι ίδια στη διεύθυνση διάδοσης και αντίθετα σε αυτή.

Η ενεργός διατομή σκέδασης σ :

$$\sigma = \frac{2\pi^5}{3} \frac{d^6}{\lambda^4} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2$$

Ο συντελεστής σκέδασης για μια ομάδα σωματιδίων – σκεδαστών, είναι ο αριθμός των σωματιδίων N ανά μονάδα όγκου επί την ενεργό διατομή σκέδασης σ

- **Σκέδαση Rayleigh** ο βαθμός σκέδασης είναι αντιστρόφως ανάλογος της τέταρτης δύναμης του μήκους κύματος λ της ακτινοβολίας

Ενεργός διατομή σκέδασης
Scattering cross-section

$$\sigma_s = \frac{2\pi^5 d^6}{3 \lambda^4} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \Rightarrow$$

Διάμετρος κέντρου σκέδασης

Μήκος κύματος ακτινοβολίας

$$\frac{I_{\lambda=450nm}}{I_{\lambda=700nm}} \approx 6$$

Σκεδαζόμενη ακτινοβολία:

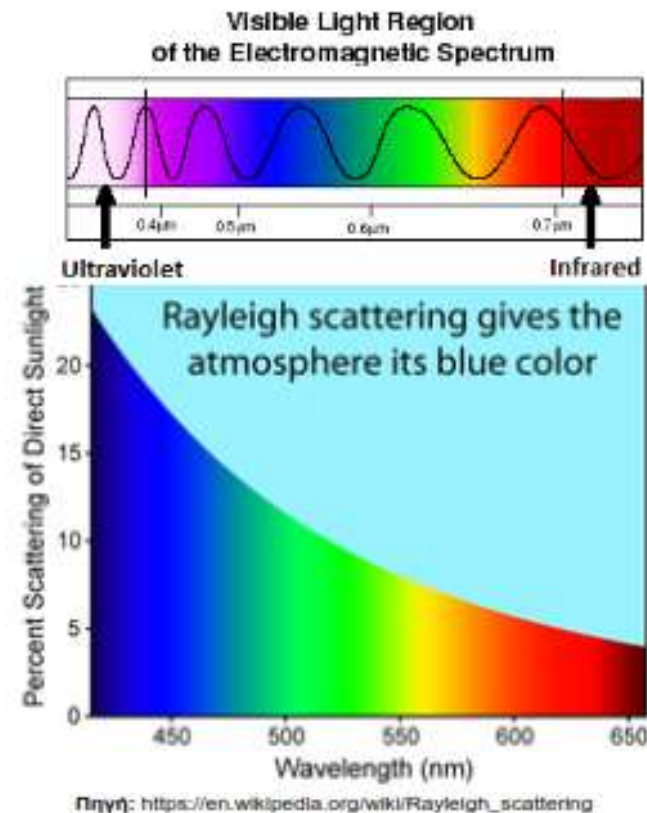
$$I_{(\lambda)} \sim 1 / \lambda^4$$

Επιλεκτική Σκέδαση

Η μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία θα υποστεί μεγαλύτερη σκέδαση

Τα **μπλε** μήκη κύματος σκεδάζουν εντονότερα

Το **μπλε** χρώμα του ουρανού



- Κατά τη δύση του ηλίου ο ουρανός είναι **κόκκινος** εξ' αιτίας της **Σκέδαση Rayleigh**

σκέδαση Mie

Ελαστική σκέδαση στην οποία διατηρείται το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όχι όμως και η διεύθυνσή της. Λαμβάνει χώρα όταν οι διαστάσεις του σκεδάζοντος υλικού έχουν διάμετρο συγκρίσιμη με το μήκος κύματος.

Στην Ατμόσφαιρα, τα σκεδαζοντα σωματίδια, αερολύματα, ομίχλη, σταγονίδια κα υφίστανται σκέδαση Mie

Η ενεργός διαφορά της σκέδασης Mie από την Rayleigh είναι ότι το πεδίο δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο γύρω από το κέντρο.

Επειδή δεν εκπέμπει δίπολο αλλά τετράπολο, οκτάπολο κ.ο.κ.

• **Σκέδαση Mie** ο βαθμός σκέδασης παρουσιάζει μικρή εξάρτηση από το μήκος κύματος λ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας

$$\text{Συντελεστή σκέδασης Mie } \mathcal{E}_{M(\lambda)} = \mathcal{E}_{M0} \cdot \lambda^{-\alpha}$$

α = παράγοντας Angstrom

$$0.5 < \alpha < 2.5$$

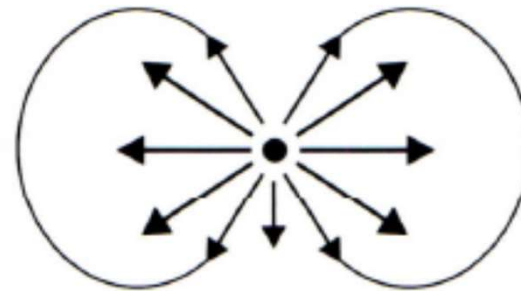
Τυπική τιμή $\alpha = 1.3$



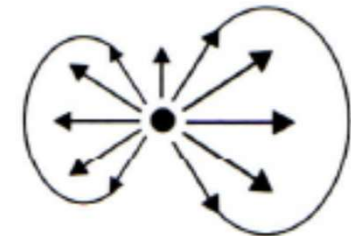
Σκεδαζόμενη ακτινοβολία:

$$I_{(\lambda)} \sim 1 / \lambda^{1.3}$$

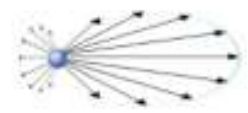
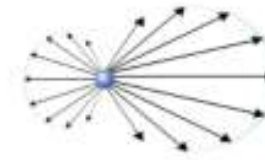
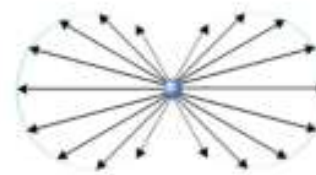
Σκέδαση Rayleigh



Σκέδαση Mie



Διεύθυνση του φωτός



Μη επιλεκτική Σκέδαση

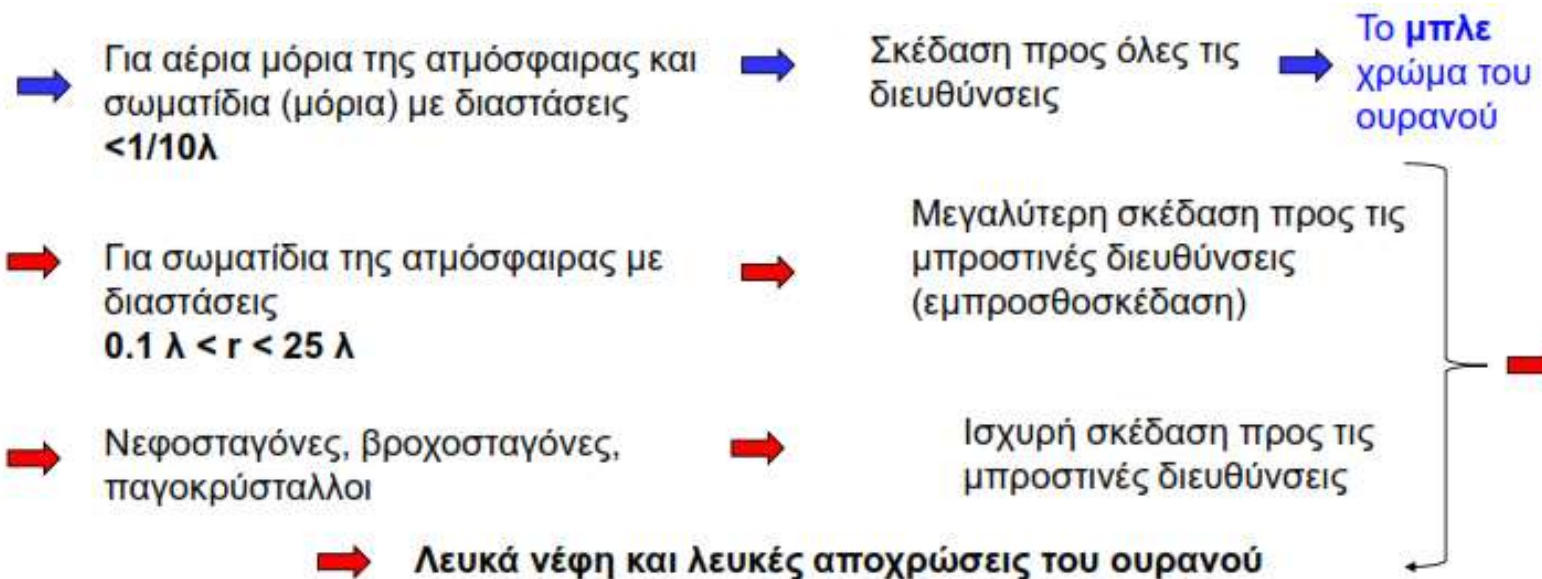
Σκεδάζουν όλα τα μήκη κύματος (χρώματα) χωρίς κάποιο από αυτά να σκεδάζει εντονότερα



Το λευκό χρώμα των νεφών και της ρυπασμένης ατμόσφαιρας

Η ένταση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας στη σκέδαση Mie είναι συνάρτηση:

- της σχέσης μεγέθους σωματιδίου και μήκους κύματος (είναι μέγιστη όταν $\lambda \approx$ μέγεθος σωματιδίων)
- του δείκτη διάθλασης
- συγκέντρωσης σωματιδίων
- της γωνίας μεταξύ των διευθύνσεων προσπίπτουσας και σκεδαζόμενης ακτινοβολίας (είναι μέγιστη προς τη διεύθυνση διάδοσης)



Η σκέδαση από αερολύματά είναι μεγαλύτερη από την Rayleigh.

Η Rayleigh είναι σημαντική για αποστάσεις μεγαλύτερες των 3km και για γωνίες περίπου 130° .

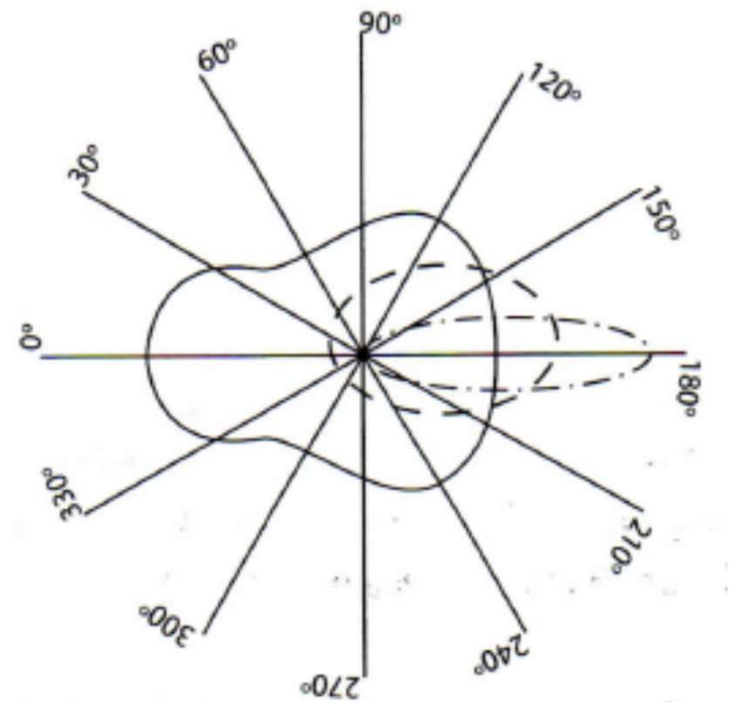
Ενώ θεωρητικά στη Rayleigh η ηλιακή ακτινοβολία σκεδάζεται μια φορά στην πράξη υπάρχει πολλαπλή σκέδαση.

Η πολλαπλή σκέδαση είναι σημαντική για μικρά ($\lambda < 0,5\mu\text{m}$) μήκη κύματος και χωρίς σημασία για $\lambda > 2,0\mu\text{m}$.

Η προς τα πάνω σκεδαζόμενη ακτινοβολία εξαρτάται από την λευκαύγεια (ανακλαστικότητα) του εδάφους.

Πολικό διάγραμμα σκέδασης Mie σε σωματίδια διαφόρων ακτίνων $r=0,05\text{m}$, πλήρης, $0,1\text{m}$, διακεκομμένη, $0,5\text{m}$ με παύλες και τελείες εναλλάξ στο πράσινο μήκος κύματος

Για μεγαλύτερα μήκη κύματος των $100\mu\text{m}$, $\alpha \gg 1$, περιγράφονται με την γεωμετρική οπτική



Ασκήσεις

1. Να βρεθεί η εξίσωση Wien χρησιμοποιώντας την εξίσωση Planck
2. Να βρεθεί η εξίσωση Stefan-Boltzmann χρησιμοποιώντας την εξίσωση Planck
3. Να βρεθεί ότι η σταθερά Stefan-Boltzmann ισούται με $5,67 \cdot 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$
4. Από την εξίσωση Stefan-Boltzmann να βρεθεί το ολοκλήρωμα επί του $\ln \lambda$ και να σχεδιαστεί η καμπύλη $T^{-4} \lambda B_{\lambda}$ με το $\ln \lambda$. Τι παρατηρείτε?
5. Με βάση το νόμο του Planck για τη μονοχρωματική ένταση ακτινοβολίας $I_{\lambda b}$, να εξαχθεί ο νόμος των Stefan-Boltzmann για την ολική ένταση ακτινοβολίας I_b μέλανος σώματος. Να βρεθεί μια αναλυτική σχέση για την σταθερά σ των Stefan-Boltzmann και να υπολογιστεί η αριθμητική της τιμή. Στην απόδειξη θα χρειαστεί να γίνει αλλαγή μεταβλητών ($x = hc/k\lambda T$) και χρήση του ολοκληρώματος:

$$\int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \pi^4 / 15$$

Ασκήσεις συνέχεια:

6. Αν η μέση ένταση εκπομπής ακτινοβολίας της φωτόσφαιρας είναι $6,2 \times 10^7 \text{ Wm}^{-2}$, η ακτίνα της φωτόσφαιρας $0,7 \times 10^6 \text{ km}$, η μέση απόσταση γης-ηλίου $150 \times 10^6 \text{ km}$, και η ακτίνα της γης-ατμόσφαιρας $6,4 \times 10^3 \text{ km}$, να βρεθεί το ποσό της ενέργειας που δέχεται το σύστημα γης-ατμόσφαιρας σε ένα λεπτό.
7. Η απόσταση d_{ES} μεταξύ του συστήματος γης-ατμόσφαιρας και του ηλίου μεταβάλλεται κατά 3,34% μεταξύ της μέγιστης τιμής της στις αρχές Ιουλίου και της ελάχιστης στις αρχές Ιανουαρίου, αφού η ακριβής τροχιά της γης περί το ήλιο είναι έλλειψη. Αποδείξτε ότι η εποχική μεταβολή στην ενεργό θερμοκρασία ακτινοβολίας TEA του συστήματος γης-ατμόσφαιρας είναι $\sim 1,65\%$, ή περίπου 4K.

Thanks for your attention!

Prof. Mic.Gr.Vrachopoulos

Τέλος κεφαλαίου



HELLENIC REPUBLIC

**National and Kapodistrian
University of Athens**

— EST. 1837 —

Βιβλιογραφία:

Αγγελική Φωτιάδη, Παν. Πατρών, «κλιματολογία – μετεωρολογία»

- Hatzianastassiou, N., A. Fotiadi, C. Matsoukas, E. Drakakis, K. Pavlakis, D. Hatzidimitriou, and I. Vardavas, (2004): Long-term global distribution of Earth's shortwave radiation budget at the top of atmosphere, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4, 1217-1235.
- Hatzianastassiou, N., C. Matsoukas, A. Fotiadi, K. Pavlakis, E. Drakakis, D. Hatzidimitriou, and I. Vardavas, (2005): Global distribution of Earth's surface shortwave radiation budget. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5, 2847-2867.
- Fotiadi, A., N. Hatzianastassiou, P.W. Stackhouse, C. Matsoukas, E. Drakakis, K.G. Pavlakis, D. Hatzidimitriou, and I. Vardavas, (2006): Spatial and Temporal Distribution of Long-Term Solar Surface Radiation Budget over Greece. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 132, 2693-2718.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση:

- Ahrens C. Donald (2001). *Essentials of Meteorology. An invitation to the Atmosphere*. Third Edition, Thomson Brooks/Cole.
- Andrews David G. (2010). *An Introduction to Atmospheric Physics*. Second Edition. Cambridge University Press.
- Brasseur G. & Solomon S. (2005). *Aeronomy of the middle atmosphere*. Springer 3rd Edition.
- Castellani B., Morini E., Filipponi M., Nicolin A., Palombo M., Cotana F. & Rossi F., “Comparative Analysis of Monitoring Devices for Particulate Content in Exhaust Gases”, *Sustainability* 2014, 6(7), 4287–4307.
- Hezberg G., 1945. *Molecular spectra and Molecular Structure*. II: Infrared and Raman Spectra of polyatomic molecules. Van Norstrand.
- Houghton D.D. (1985). *Handbook of Applied Meteorology*, Wiley, New York, 1461.
- Melnikova Irina N., Vasilyev Alexander V. (2005). *Short-Wave Solar Radiation in the Earth's Atmosphere*. Springer.
- Muhammad Iqbal (1983). *An Introduction to Solar Radiation*, Academic Press.
- Muneer Tariq (2004). *Solar radiation and daylight models*. Elsevier Pub Co.
- Richard M. Goody, Gray Walker James Callan (1972). *Atmospheres*, Prentice-Hall.
- Robinson Nathan (1966). *Solar Radiation*. Elsevier Pub Co.
- Skinner Brian J., Porter C. Stephen (1995). *The blue planet: An Introduction to Earth System Science*. John Wiley & Sons.

Ελληνική:

Αλυσσανδράκης Κ., Νίντος Α., Πατσουράκος Σ. (2015). *Φυσική του Ηλίου και του Διαστήματος*, e-book. ISBN 978-960-603-430-5.

Ηλίας Δ. (1976). *Φυσική της Ατμόσφαιρας-Μετεωρολογία*. Σημειώσεις που διδάσκονταν στους φοιτητές του Πανεπιστημίου Πατρών.

Καραλής Ι. (Διδάσκων). Σημειώσεις από τις παραδόσεις του μαθήματος *Ακτινοβολία* του Μεταπτυχιακού Ενδεικτικού στη Μετεωρολογία του Πανεπιστημίου Αθηνών.

Κατσούλης Β. Δ. (2000). *Μαθήματα Μετεωρολογίας*. Σημειώσεις που διδάσκονται στους φοιτητές του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Κατσούλης Β.Δ., Ν. Χατζηαναστασίου (2007). *Φυσική της Ατμόσφαιρας*. Σημειώσεις που διδάσκονται στους φοιτητές του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Κατσούλης Β.Δ., Π. Κασσωμένος, 2006. *Φυσική Περιβάλλοντος*. Σημειώσεις που διδάσκονται στους φοιτητές του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Μελάς Δ. (2007). *Φυσική του Ατμοσφαιρικού Περιβάλλοντος*. Σημειώσεις που διδάσκονται στους φοιτητές του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Σαχσαμάνογλου Χ.Σ., Μακρογιάννης Τ.Ι. (1998). *Γενική Μετεωρολογία*, Εκδόσεις Ζήτη.

Φλόκας Α. (1994). *Μαθήματα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας*, Εκδόσεις Ζήτη.

Χρονοπούλου-Σερέλη Α., Φλόκας Α. (2010). *Μαθήματα Γεωργικής Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας*, Εκδόσεις Ζήτη.