



Ατμοσφαιρική Ρύπανση

Ενότητα 3: Ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα

Μουσιόπουλος Νικόλαος
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

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 Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την 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.





ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΑΝΟΙΚΤΑ
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΑ
ΜΑΘΗΜΑΤΑ



Ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Περιεχόμενα ενότητας

- Θεωρητικές βάσεις.
- Διάδοση ακτινοβολίας.
- Ισοζύγιο ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα.
- Κατακόρυφη δομή της ατμόσφαιρας.



Σκοποί ενότητας

- Θεωρητικές βάσεις ακτινοβολίας.
- Ακτινοβολία μελανών σωμάτων.
- Ισοζύγιο ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα.
- Κατακόρυφη κατανομή θερμότητας.



Θεωρητικές βάσεις

$c = v \cdot \lambda$, εξίσωση κύματος

λ : μήκος κύματος και

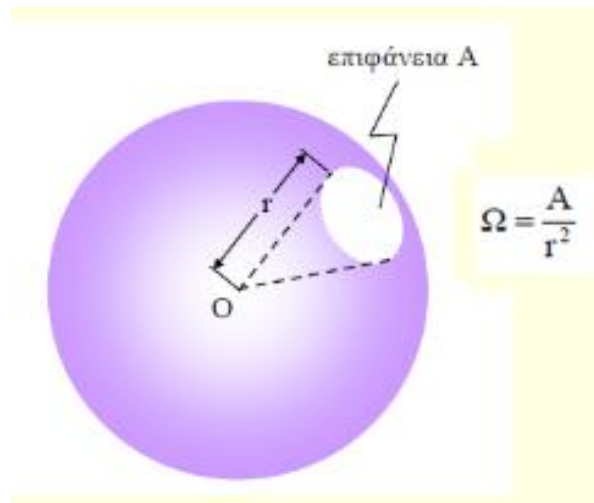
v : συχνότητα ακτινοβολίας.

- Μονοχρωματική ακτινοβολία: Ακτινοβολία ενός μόνο κύματος.
- Ειδική ένταση μονοχρωματικής ακτινοβολίας I_λ [$W/(m^2 \mu m)$]:
 - Ενέργεια ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης ανά μονάδα χρόνου και ανά στερεά γωνία για μήκος κύματος μεταξύ λ και $\lambda+d\lambda$.



Θεωρητικές βάσεις: Στερεά γωνία

Ορίζεται ως στερεά γωνία Ω το πηλίκο τμήματος επιφάνειας σφαίρας, που αποκόπτεται από κώνο ο οποίος έχει κορυφή το κέντρο της σφαίρας, δια του τετραγώνου της ακτίνας.

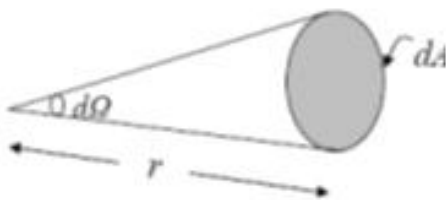


Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayupx>, 05/07/2015.



Θεωρητικές βάσεις (1/6)

- Στερεά γωνία (μονάδα: steradians)



$$d\Omega = dA/r^2$$

Σε σφαιρικές συντεταγμένες:

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} = \sin\theta \, d\theta \, d\varphi$$

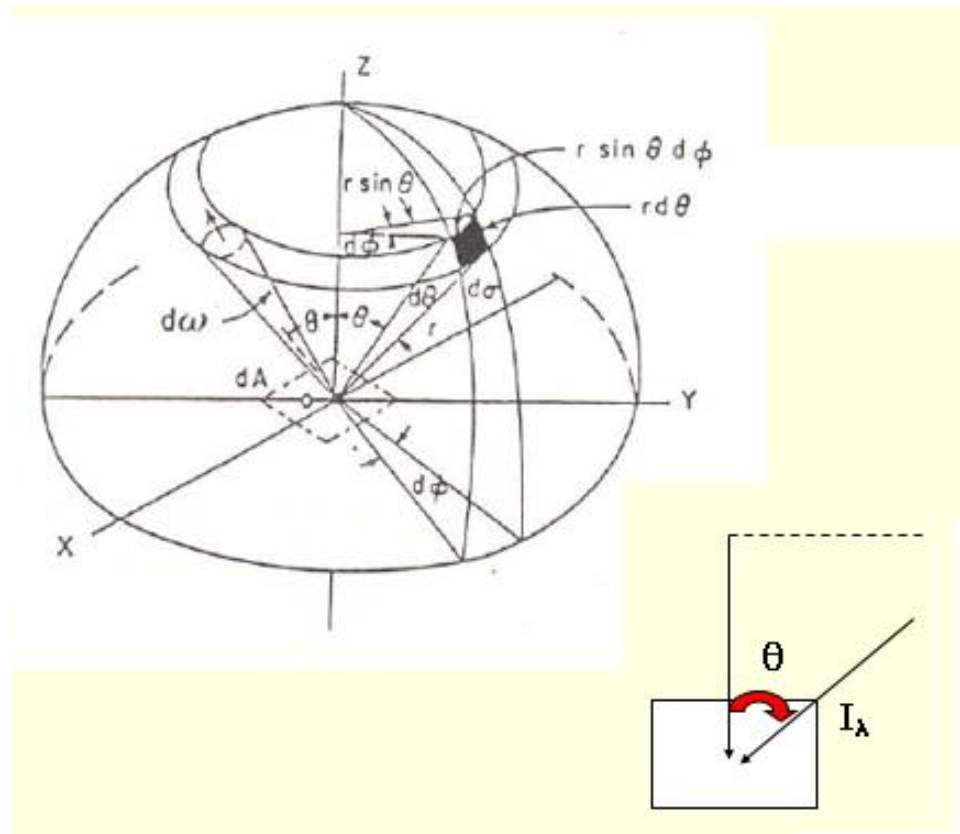
θ : γωνία ζενίθ

φ : αζιμουθιανή γωνία

Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayurx>, 05/07/2015.



Θεωρητικές βάσεις (2/6)



Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayupx>, 05/07/2015.



Θεωρητικές βάσεις (3/6)

Ροή μονοχρωματικής ακτινοβολίας:

$$F_{\lambda} = \int_{\Omega} I_{\lambda} \cos \theta \, d\Omega$$

Ισοτροπική ακτινοβολία:

$$F_{\lambda} = \pi I_{\lambda}$$

Συνολική ροή ακτινοβολίας:

$$F = \int_0^{\infty} F_{\lambda} \, d\lambda$$



Θεωρητικές βάσεις (4/6)

Μέλαν σώμα: Σώμα που έχει την ιδιότητα να απορροφά όλη την προσπίπτουσα ακτινοβολία και να εκπέμπει ποσότητα $B_\lambda(T)$ σύμφωνα με τη **συνάρτηση του Planck**:

$$k = 1,3805 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

σταθερά Boltzmann

ταχύτητα φωτός στο κενό

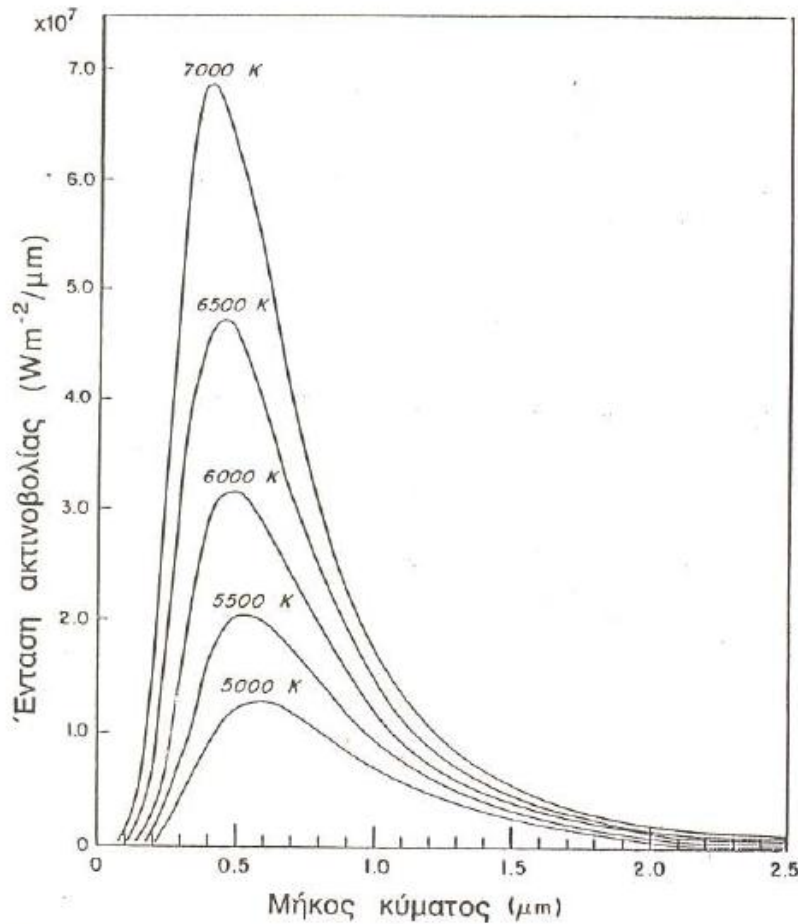
σταθερά Planck

$$B_\lambda(T) = \frac{2 c^2 h \lambda^{-5}}{\exp\left[\frac{h c}{\lambda k T}\right] - 1}$$

Νόμος μετατόπισης του Wien: Μήκος κύματος για το οποίο παρατηρείται το μέγιστο της ακτινοβολίας ενός μέλανος σώματος:



Ακτινοβολία μελανών σωμάτων διαφόρων θερμοκρασιών



Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayurx>,
05/07/2015.



Θεωρητικές βάσεις (5/6)

Ισοτροπία: $B(T) = \pi B_\lambda(T)$

Νόμος των Stefan-Boltzmann:

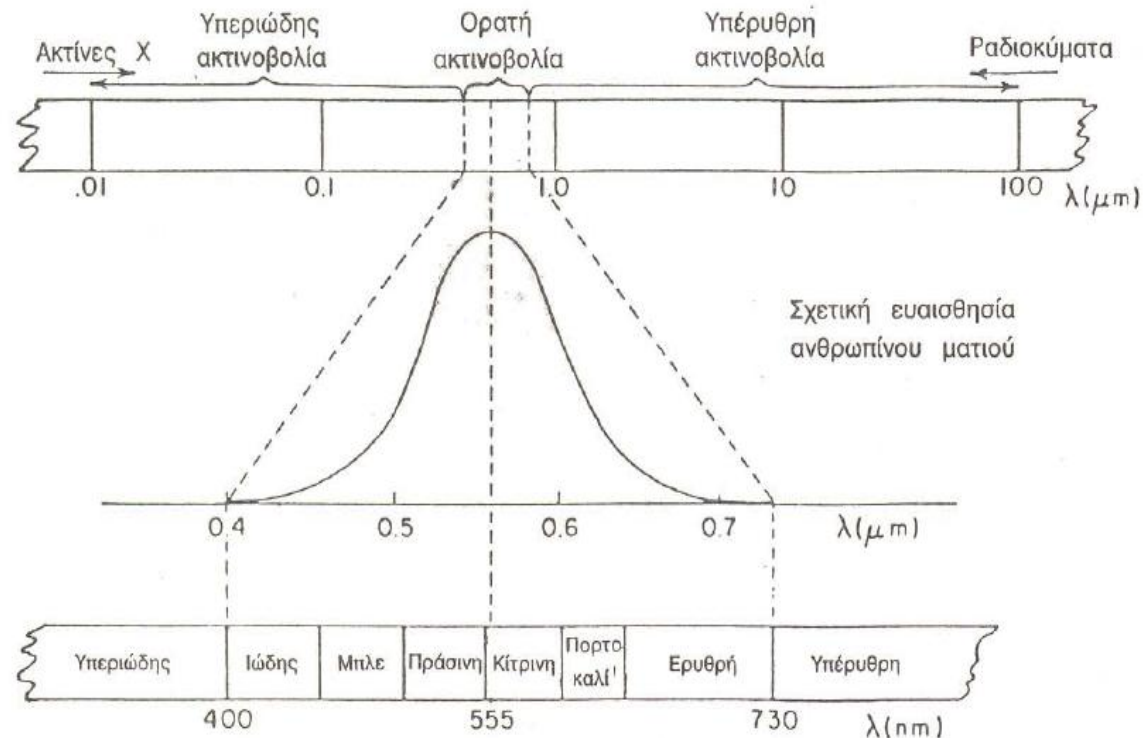
$$W_b = \int_0^{\infty} \pi B_\lambda(T) d\lambda = \sigma T^4$$

όπου $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ η σταθερά ακτινοβολίας (ή σταθερά των Stefan-Boltzmann).



Φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Η ακτινοβολία είναι ορατή για μήκη κύματος μεταξύ περίπου 400 και 730 nm.



Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayuyx>, 05/07/2015.



Θεωρητικές βάσεις (6/6)

Σε αντίθεση με ένα μέλαν σώμα, ένα *φαιό σώμα* απορροφά μόνο ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που προσδιορίζεται από τον βαθμό απορρόφησης α .

Παράλληλα ένα φαιό σώμα εκπέμπει μόνο ένα μέρος της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος που προσδιορίζεται από τον βαθμό εκπομπής ε .

Νόμος του Kirchhoff:

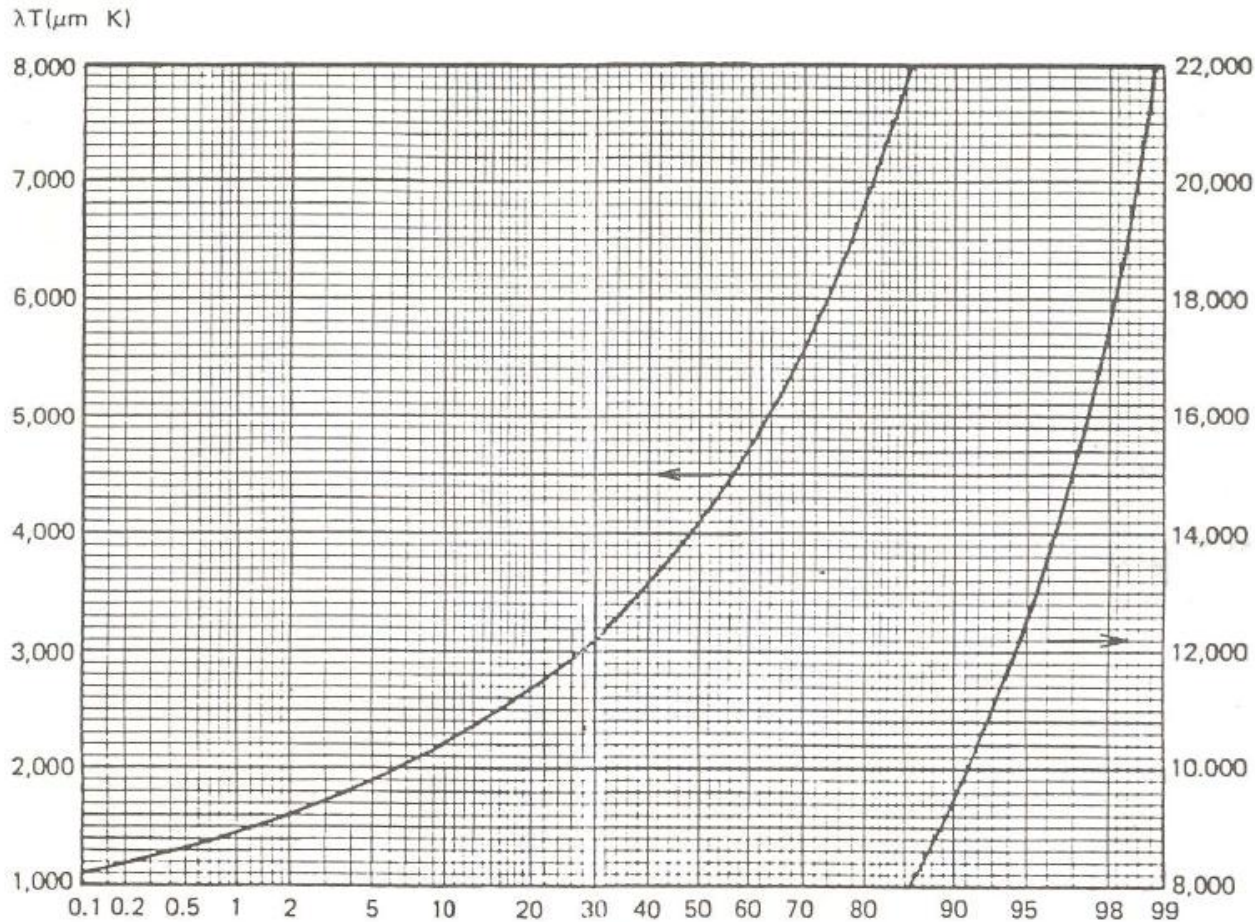
Σε περίπτωση θερμοδυναμικής ισορροπίας $\alpha = \varepsilon$

α και ε είναι συναρτήσεις του μήκους κύματος! π.χ. το χιόνι είναι

- μέλλαν σώμα ($\alpha_\lambda = 1$) για $4 < \lambda < 100\mu\text{m}$ (υπέρυθρη ακτινοβολία)
- περίπου λευκό σώμα ($\varepsilon_\lambda = 1$) για $0,4 < \lambda < 0,73 \mu\text{m}$ (ορατή ακτινοβολία).



Η συνάρτηση $\Phi(\theta, \lambda_i, T)$



Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayurx,05/07/2015>.



Διάδοση ακτινοβολίας (1/2)

Η ακτινοβολία υφίσταται:

- **Εξασθένηση** λόγω απορρόφησης ή σκέδασης
- **Επαύξηση** λόγω εκπομπής της ίδιας της αέριας μάζας.

Διαφορικό ισοζύγιο:

$$dI_{\lambda} = -\kappa_{\lambda} \rho I_{\lambda} ds + j_{\lambda} \rho ds$$

κ_{λ} : μαζικός συντελεστής εξασθένησης [m^2/kg]

$$\kappa_{\lambda} = a_{\lambda} + s_{\lambda}$$

a_{λ} : συντελεστής απορρόφησης, s_{λ} : συντελεστής σκέδασης.

Ειδική εκπομπή ακτινοβολίας [$\text{W}/(\text{kg } \mu\text{m})$]: $j_{\lambda} = e_{\lambda} B_{\lambda}(T)$

e_{λ} [m^2/kg]: συντελεστής εκπομπής

θερμοδυναμική ισορροπία (νόμος Kirchhoff): $e_{\lambda} = a_{\lambda}$



Διάδοση ακτινοβολίας (2/2)

Αμελητέα εκπομπή π.χ. συντρέπει ως προς τη διάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα => Νόμος Beer, Bouguer και Lambert

$dI_\lambda = -\kappa_\lambda \rho I_\lambda ds + j_\lambda \rho ds \Rightarrow I_\lambda = I_{\lambda 0} \exp(-\kappa_\lambda u)$ (στην περίπτωση ομοιογενούς ατμόσφαιρας).

$$u \equiv \int_0^s \rho ds' \quad \text{οπτική διαδρομή [kg/m}^2\text{]}$$

Οπτικό πάχος: $\tau_\lambda = \kappa_\lambda u$

Οπτική διαπερατότητα: $T_\lambda = \exp(-\tau_\lambda)$

- Για $0,4\mu\text{m} < \lambda < 0,73\mu\text{m}$ για ολόκληρη τη διαδρομή στην ατμόσφαιρα $T_\lambda \sim 0,95 \Rightarrow$ η ατμόσφαιρα είναι κατά 95% διαπερατή από την ορατή ακτινοβολία.
- Για την υπεριώδη ακτινοβολία $T_\lambda < 0,01 \Rightarrow$ σχεδόν ολοκληρωτική εξασθένηση της υπεριώδους ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα.



Ισοζύγιο ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα (1/7)

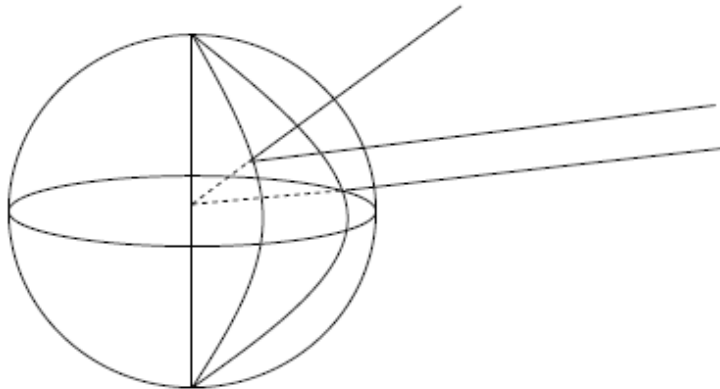
Το ισοζύγιο ακτινοβολίας γίνεται ξεχωριστά για

- ηλιακή ακτινοβολία (ακτινοβολία βραχέων κυμάτων)
- γήινη ακτινοβολία (ακτινοβολία μακρών κυμάτων)

Ένταση ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα

$$I_{\infty} = \int_0^{\infty} I_{\lambda} d\lambda$$

λέγεται *ηλιακή σταθερά* = 1,353 kW/m²



Γωνία ζενίθ:

$$\theta = \arccos[\sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos h]$$

ϕ : γεωγραφικό πλάτος

δ : λόξωση εκλειπτικής

h : γωνία ώρας

+ εξασθένηση ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα ($I_{\infty} \rightarrow I$) =>

$$I_s = I \cos\theta \quad \text{άμεση ακτινοβολία}$$

Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayurpx>, 05/07/2015.



Ισοζύγιο ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα (2/7)

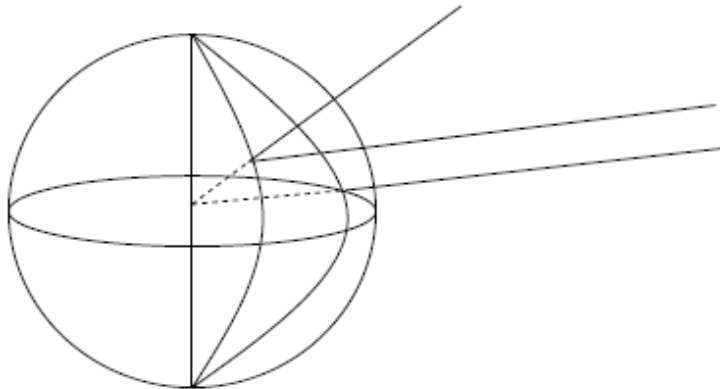
Το ισοζύγιο ακτινοβολίας γίνεται ξεχωριστά για

- ηλιακή ακτινοβολία (ακτινοβολία βραχέων κυμάτων)
- γήινη ακτινοβολία (ακτινοβολία μακρών κυμάτων)

Ένταση ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα

$$I_{\infty} = \int_0^{\infty} I_{\lambda} d\lambda$$

λέγεται *ηλιακή σταθερά* = 1,353 kW/m²



Γωνία ζενίθ:

$$\theta = \arccos[\sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos h]$$

ϕ : γεωγραφικό πλάτος

δ : λόξωση εκλειπτικής

h : γωνία ώρας

+ εξασθένηση ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα ($I_{\infty} \rightarrow I$) =>

$$I_s = I \cos\theta \quad \text{άμεση ακτινοβολία}$$

Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayurpx>, 05/07/2015.



Ισοζύγιο ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα (3/7)

Εξασθένηση ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα οφείλεται σε:

- **Απορρόφηση** (σχεδόν αποκλειστικά από το *όζον*, κυρίως για μήκη κύματος $\lambda < 0,29\mu\text{m}$ και από τους *υδρατμούς-υγρασία*).
- **Σκέδαση** (*ανάκλαση* της ακτινοβολίας και κυρίως για $\lambda < 0,8\mu\text{m}$ δηλ. υπεριώδης και ορατή ακτινοβολία).
 - **Σκέδαση Rayleigh:** ακτινοβολία σκεδάζεται σε σωματίδια με διάμετρο $d \ll \lambda$ (π.χ. μόρια και μικρά σωματίδια με $d < 0,1\mu\text{m}$).
Συντελεστής σκέδασης Rayleigh εξαρτάται από το μήκος κύματος ($\sim \lambda^{-4}$)
 \Rightarrow μεταβολές στη φασματική κατανομή του φωτός \Rightarrow π.χ. μπλε χρώμα του ουρανού και κόκκινο χρώμα του ουρανού κατά την ανατολή και τη δύση του ήλιου.
 - **Σκέδαση Mie:** ακτινοβολία σκεδάζεται από μεγαλύτερα σωματίδια, $d \sim 1/10 \lambda$.
Συντελεστής σκέδασης Mie ανεξάρτητος του μήκους κύματος \Rightarrow φάσμα φωτός αμετάβλητο \Rightarrow π.χ. λευκό χρώμα συννέφων, φαιό χρώμα ρυπαρής ατμόσφαιρας.



Ισοζύγιο ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα (4/7)

Σκέδαση => Έμμεση ακτινοβολία, D , (πολλές φορές ξεπερνά την άμεση)

Συνθήκες νέφωσης + επίπεδα ρύπανσης => ένταση έμμεσης ακτινοβολίας.

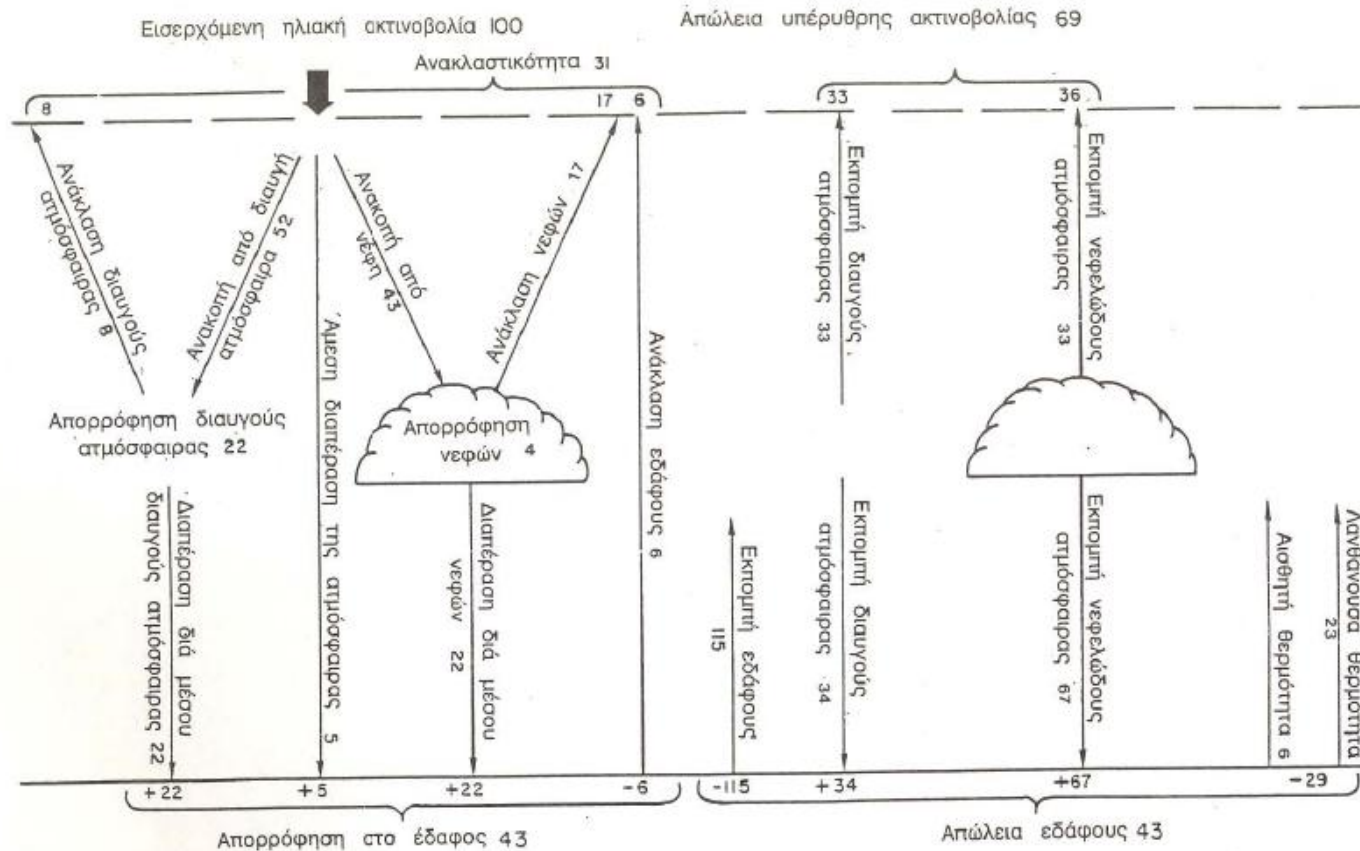
Συνολική ηλιακή ακτινοβολία: $R_s = I_s + D$

Η επιφάνεια του εδάφους απορροφά την ποσότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που δεν ανακλάται: $R_a = R_s (1-A)$

A : ανακλαστικότητα του εδάφους (albedo)



Ισοζύγιο ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα (5/7)



Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayupx>, 05/07/2015.



Ισοζύγιο ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα (6/7)

Γήινη ακτινοβολία (ακτινοβολία μακρών κυμάτων)

- Σκέδαση αμελητέα.
- Εκπομπή ακτινοβολίας από το έδαφος (~μέλαν σώμα, $R_o = \sigma T_o^4$)
- Ατμοσφαιρική ακτινοβολία που προσπίπτει στο έδαφος, R_a

Ισοζύγιο γήινης ακτινοβολίας στο έδαφος:

$$R_{\text{eff}} = \sigma T_o^4 - R_a$$

συνήθως $R_{\text{eff}} > 0$.



Ισοζύγιο ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα (7/7)

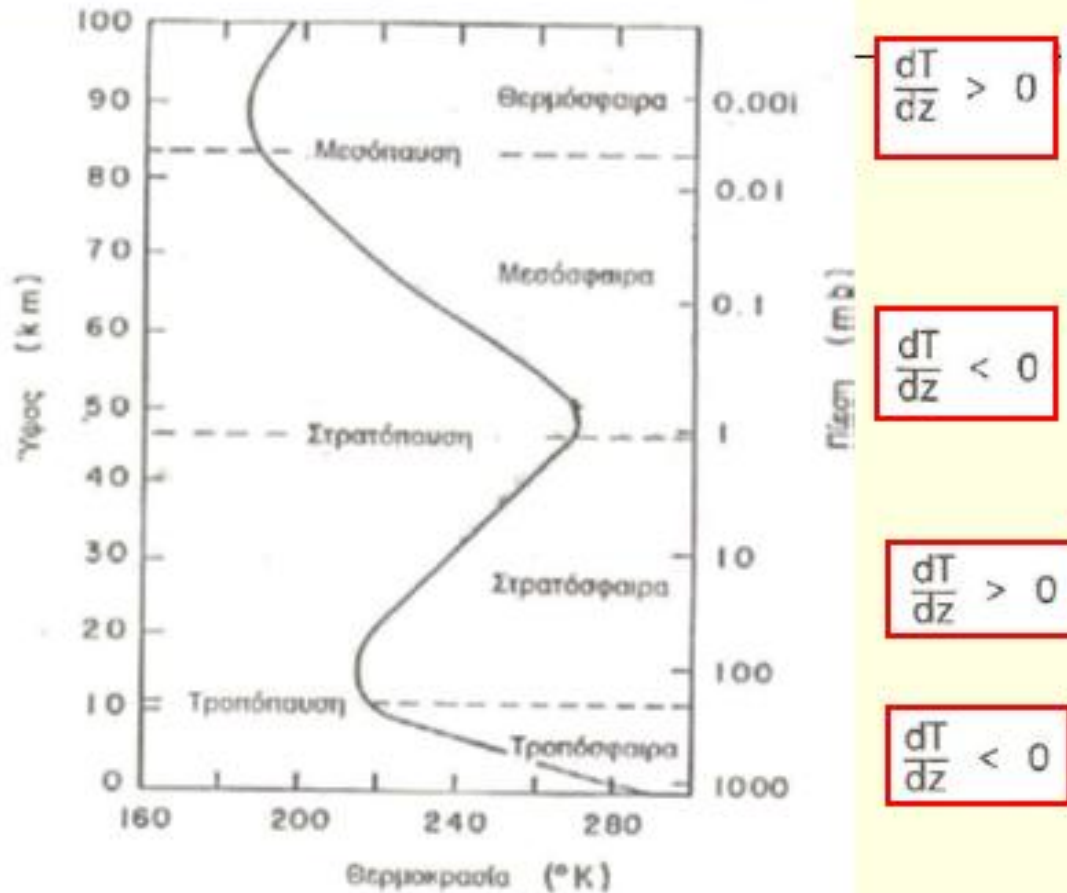
Συνολικό ισοζύγιο ακτινοβολίας στο έδαφος:

$$\Delta = R_s (1-A) - R_{\text{eff}}$$

Συνήθως $\Delta > 0 \Rightarrow$ έδαφος κερδίζει ενέργεια με τη μεταφορά ακτινοβολίας. Την ενέργεια αυτή χάνει η ατμόσφαιρα. Το αντιστάθμισμα γίνεται με τη μεταφορά ασηθής και λανθάνουσας θερμότητας από το έδαφος προς την ατμόσφαιρα.



Κατακόρυφη κατανομή θερμοκρασίας



Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayupx>, 05/07/2015.



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων

- Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:
 - Εικόνες/Σχήματα/Διαγράμματα/Φωτογραφίες:
 - <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0aγυρχ,05/07/2015>.



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Μουσιόπουλος Νικόλαος. «Ατμοσφαιρική Ρύπανση. Ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα». Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://eclass.auth.gr/courses/OCRS407/>



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά - Μη Εμπορική Χρήση - Όχι Παράγωγα Έργα 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. 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».



Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>





Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: <Περκουλίδης Γιώργος>
Θεσσαλονίκη, <Εαρινό Εξάμηνο 2014-2015>



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Σημειώματα

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

