



ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ενότητα 7: Ακτινοβολία

Χατζηαθανασίου Βασίλειος

Καδή Στυλιανή

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ



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 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.





Ακτινοβολία



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Περιεχόμενα ενότητας

1. Ακτινοβολία μέλανος σώματος
2. Εκπομπή σε ζώνη
3. Εκπομπή από επιφάνεια
4. Ο νόμος του Kirchhoff
5. Συντελεστής θέας
6. Συναλλαγή θερμικής ακτινοβολίας
7. Αποπομπή



Μεθοδολογία (1/2)

- Εισαγωγή
- Ακτινοβολία μέλανος σώματος
 - ολική.
 - φασματική.
- Εκπομπή από επιφάνεια
 - φασματικός συντελεστής εκπομπής.
 - γωνιακός συντελεστής εκπομπής.
 - ημισφαιρικός συντελεστής εκπομπής.



Μεθοδολογία (2/2)

- απορρόφηση, ανάκλαση, διαπερατότητα.
- νόμος Kirchhoff.
- συντελεστές θέας- Ιδιότητες.
- συναλλαγή θερμικής ακτινοβολίας μεταξύ μελανών επιφανειών.
- συναλλαγή θερμικής ακτινοβολίας μεταξύ τεφρών ισότροπων επιφανειών.



Ακτινοβολία (1/3)



Εικόνα 1: Ψύξη στερεού με ακτινοβολία σε θάλαμο κενού



Ακτινοβολία (2/3)

- Είναι γνωστό ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα αντιπροσωπεύουν την ενέργεια που εκπέμπει η ύλη λόγω των αλλαγών στη διάταξη των ηλεκτρονίων των ατόμων ή των μορίων. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός και χαρακτηρίζονται από την συχνότητα ν και το μήκος κύματος λ . Τα μεγέθη αυτά συνδέονται σ' ένα μέσο με τη σχέση:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

όπου c είναι η ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο μέσο. Για το κενό είναι

$$c_0 = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$$



Ακτινοβολία (3/3)

- Συχνά είναι χρήσιμο να θεωρηθεί η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σαν διάδοση διακριτών ενεργειακών πακέτων που ονομάζονται φωτόνια ή κβάντα. Η ενέργεια φωτονίου με συχνότητα ν είναι:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

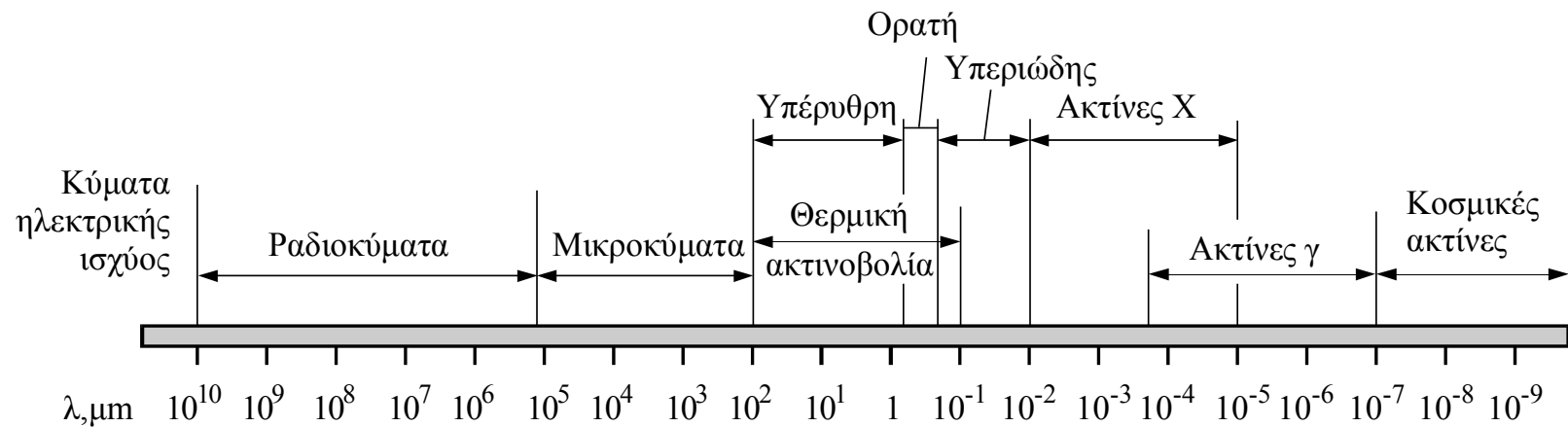
όπου

$$h = 6,625 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

- Επικίνδυνες είναι οι ακτινοβολίες μικρού μήκους κύματος (π.χ. γάμα, ακτίνες X).



Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (1/2)



Εικόνα 2: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα



Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (2/2)

- *Θερμική ακτινοβολία* είναι το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος μεταξύ 0,1 και 100 μm . Περιλαμβάνει ολόκληρη την ορατή και την υπέρυθρη και ένα τμήμα της υπεριώδους ακτινοβολίας.
- Το φως είναι η ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και εκτείνεται από 0.40 ως 0.76 μm .
- Η *ηλιακή ακτινοβολία* καταλαμβάνει τη ζώνη μεταξύ 0.3 ως 3 μm . Σχεδόν το μισό της είναι φως ενώ το υπόλοιπο υπεριώδης και υπέρυθρη.
- Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα σώματα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι υπέρυθρη. Τα σώματα αρχίζουν να εκπέμπουν αξιοσημείωτη ορατή ακτινοβολία σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 800 K.



Ζώνες μήκους κύματος διαφόρων χρωμάτων

Χρώμα	Εύρος μήκους κύματος
Ιώδες	0.40 – 0.44 μm
Μπλε	0.44 – 0.49 μm
Πράσινο	0.49 – 0.54 μm
Κίτρινο	0.54 – 0.60 μm
Πορτοκαλί	0.60 – 0.63 μm
Κόκκινο	0.63 – 0.76 μm

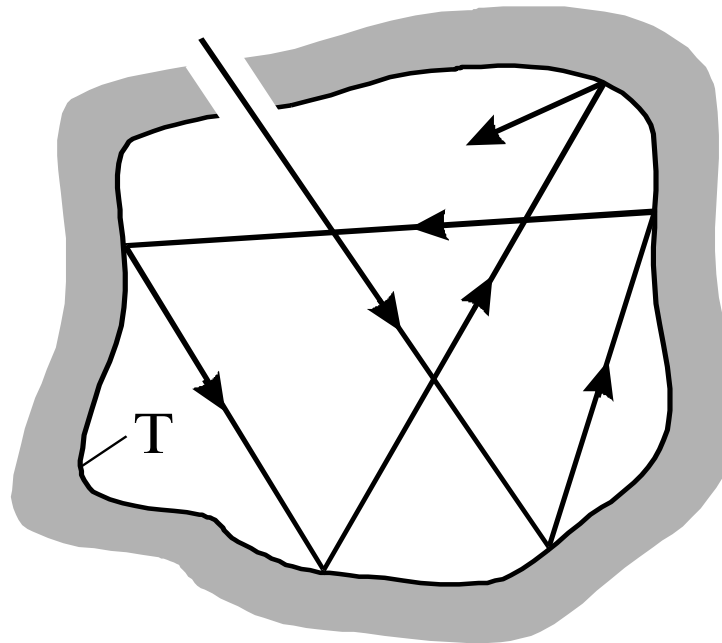


Ακτινοβολία μέλανος σώματος

- *Μέλαν σώμα* είναι μια ιδανική επιφάνεια η οποία:
 - Απορροφά όλη την προσπίπτουσα σ' αυτή ακτινοβολία, ανεξάρτητα από το μήκος κύματος ή τη διεύθυνση πρόσπτωσης.
 - Για οποιοδήποτε μήκος κύματος, εκπέμπει περισσότερη ενέργεια από οποιαδήποτε άλλη επιφάνεια της ίδιας θερμοκρασίας.
 - Εκπέμπει ισότροπα, δηλαδή με την ίδια ένταση προς όλες τις κατευθύνσεις.



Προσέγγιση μέλανος σώματος



Εικόνα 3: Ισοθερμοκρασιακή κοιλότητα – προσέγγιση μέλανος σώματος



Ακτινοβολία μέλανος σώματος

- Η ολική ισχύς που ακτινοβολείται από μέλαν σώμα ανά μονάδα επιφανείας καθορίζεται από τον Νόμο των *Stefan-Boltzmann*:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (\text{W} / \text{m}^2)$$

όπου $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}^4$

είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann και T η απόλυτη θερμοκρασία της επιφάνειας σε K . Το μέγεθος E_b ονομάζεται ολική ισχύς εκπομπής μέλανος σώματος.



Κατανομή Planck (1/2)

- Φασματική ισχύ εκπομπής: η ενέργεια που εκπέμπεται από μέλαν σώμα απόλυτης θερμοκρασίας T ανά μονάδα χρόνου, ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα μήκους κύματος γύρω από καθορισμένο μήκος κύματος λ . Προκύπτει από την κατανομή Planck:

$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2 / \lambda T) - 1]} \quad [\text{W} / \text{m}^2 \cdot \mu\text{m}]$$

όπου:

$$C_1 = 2\pi h c_0^2 = 3,742 \times 10^8 \quad \text{W} \cdot \mu\text{m}^4 / \text{m}^2$$

$$C_2 = h c_0 / k = 1,439 \times 10^4 \quad \mu\text{m} \cdot \text{K}$$



Κατανομή Planck (συν.)

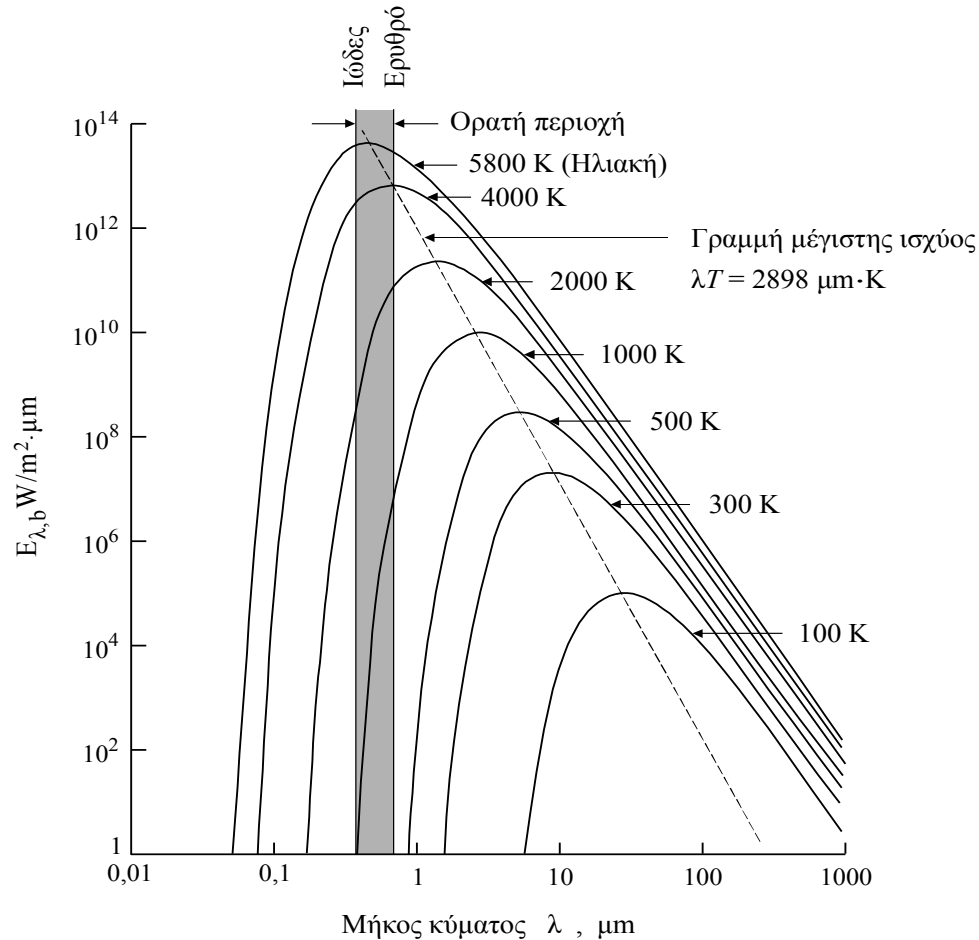
- Οι σταθερές C_1 και C_2 ονομάζονται πρώτη και δεύτερη σταθερά ακτινοβολίας αντίστοιχα, λ είναι το μήκος κύματος και

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

είναι η σταθερά *Boltzmann*.



Φασματική ισχύς εκπομπής μέλανος σώματος (1/3)



Εικόνα 4: Φασματική ισχύς εκπομπής μέλανος σώματος

ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ



Φασματική ισχύς εκπομπής μέλανος σώματος (2/3)

- Η ακτινοβολία που εκπέμπεται είναι συνεχής συνάρτηση του μήκους κύματος. Για κάθε θερμοκρασία, αυξάνεται με το μήκος κύματος, φθάνει σ' ένα μέγιστο και στη συνέχεια μειώνεται καθώς το μήκος κύματος αυξάνεται.
- Για κάθε μήκος κύματος, η ενέργεια που ακτινοβολείται αυξάνει με τη θερμοκρασία.
- Η φασματική περιοχή στην οποία συγκεντρώνεται η ακτινοβολία εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Σχετικά μεγαλύτερο ποσοστό της ακτινοβολίας εκπέμπεται σε μικρότερα μήκη κύματος καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται.
- Σημαντικό ποσοστό της ακτινοβολίας του ήλιου, ο οποίος θεωρείται μέλαν σώμα θερμοκρασίας 5762 K (ή προσεγγιστικά 5800 K) είναι στην ορατή περιοχή του φάσματος. Ο ήλιος λοιπόν είναι συντονισμένος με τα μάτια μας. Αντίθετα επιφάνειες με $T \leq 800$ K εκπέμπουν σχεδόν στην υπέρυθρη περιοχή και για το λόγο αυτό δεν είναι ορατές εκτός αν ανακλούν φως από άλλες πηγές.



Φασματική ισχύς εκπομπής μέλανος σώματος (3/3)

- Ολική ισχύς εκπομπής: προκύπτει από ολοκλήρωση της φασματικής ισχύος εκπομπής σ' ολόκληρο το φάσμα:

$$E_b(T) = \int_0^{\infty} E_{\lambda,b}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (\text{W} / \text{m}^2)$$



Νόμος της μετατόπισης του Wien

$$\lambda_{\max} T = 2897,8 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

- Το μέγιστο της ηλιακής ακτινοβολίας, θα είναι σε μήκος κύματος $\lambda = 2897,8 / 5762 = 0,50 \mu\text{m}$ που είναι κοντά στο μέσον της ορατής περιοχής. Το μέγιστο ακτινοβολίας από επιφάνεια σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T = 298 \text{ K}$) είναι σε μήκος κύματος $9,72 \mu\text{m}$ που είναι στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος.



Εκπομπή σε ζώνη

$$\begin{aligned} f_{\lambda} &= \frac{\int_0^{\lambda} E_{\lambda,b}(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\lambda,b}(\lambda, T) d\lambda} = \frac{\int_0^{\lambda} E_{\lambda,b}(\lambda, T) d\lambda}{\sigma T^4} = \\ &= \int_0^{\lambda T} \frac{E_{\lambda,b}(\lambda, T) d\lambda}{\sigma T^5} d(\lambda T) = f(\lambda, T) \end{aligned}$$

- Επειδή το όρισμα ($E_{\lambda,b}/\sigma T^5$) είναι συνάρτηση μόνο του γινομένου λT , το ολοκλήρωμα υπολογίζεται σε συνάρτηση μόνο του λT . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα.



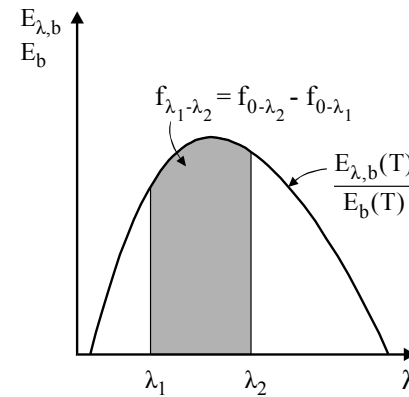
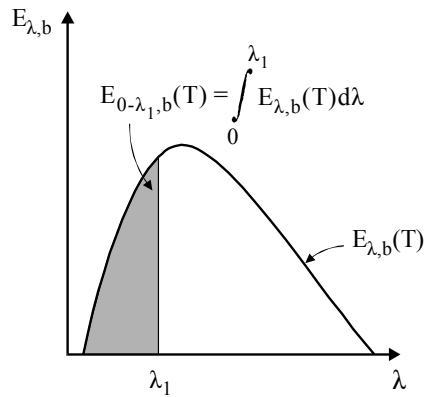
Ποσοστό f_λ ακτινοβολίας μέλανος σώματος

$\lambda T(\mu\text{m.K})$	f_λ
200	0.000000
400	0.000000
600	0.000000
800	0.000016
1000	0.000321
1200	0.002134
1400	0.007790
1600	0.019718
1800	0.039341
2000	0.066728



Εκπομπή σε ζώνη

$$f_{\lambda_1-\lambda_2} = \frac{\int_0^{\lambda_2} E_{\lambda,b}(\lambda, T) d\lambda - \int_0^{\lambda_1} E_{\lambda,b}(\lambda, T) d\lambda}{\sigma T^4} = f_{\lambda_2} - f_{\lambda_1}$$



- Ακτινοβολία μέλανος σώματος
 - α. στη ζώνη μεταξύ 0 και λ
 - β. στη ζώνη μεταξύ λ_1 και λ_2



Εκπομπή από επιφάνεια (1/5)

- Μέλαν σώμα: επιφάνεια αναφοράς.
- Συντελεστής εκπομπής ε : ο λόγος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μια επιφάνεια προς την ακτινοβολία που εκπέμπει μέλαν σώμα ίδιας θερμοκρασίας. Προφανώς θα είναι $0 \leq \varepsilon \leq 1$.
- Ακτινοβολία επιφάνειας: εξαρτάται από:
 - τη θερμοκρασία.
 - το μήκος κύματος.
 - τη διεύθυνση εκπομπής.



Εκπομπή από επιφάνεια (2/5)

- Φασματικός συντελεστής εκπομπής ε_λ : ενδιαφέρει η ακτινοβολία επιφάνειας σε συγκεκριμένο μήκος κύματος.
- Γωνιακός συντελεστής εκπομπής ε_θ : ακτινοβολία ως προς ορισμένη διεύθυνση εκπομπή.
- Ο ημισφαιρικός συντελεστής εκπομπής αντιπροσωπεύει μια μέση τιμή της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ως προς όλες τις πιθανές διευθύνσεις εκπομπής.
- Ο ολικός ημισφαιρικός συντελεστής εκπομπής ή απλά ολικός συντελεστής εκπομπής αντιστοιχεί στο μέσο όρο ως προς όλες τις διευθύνσεις εκπομπής και όλα τα μήκη κύματος. Ορίζεται από τη σχέση:

$$\varepsilon(T) \equiv \frac{E(T)}{E_b(T)}$$

- όπου $E(T)$ είναι η συνολική ισχύς εκπομπής της πραγματικής επιφάνειας.

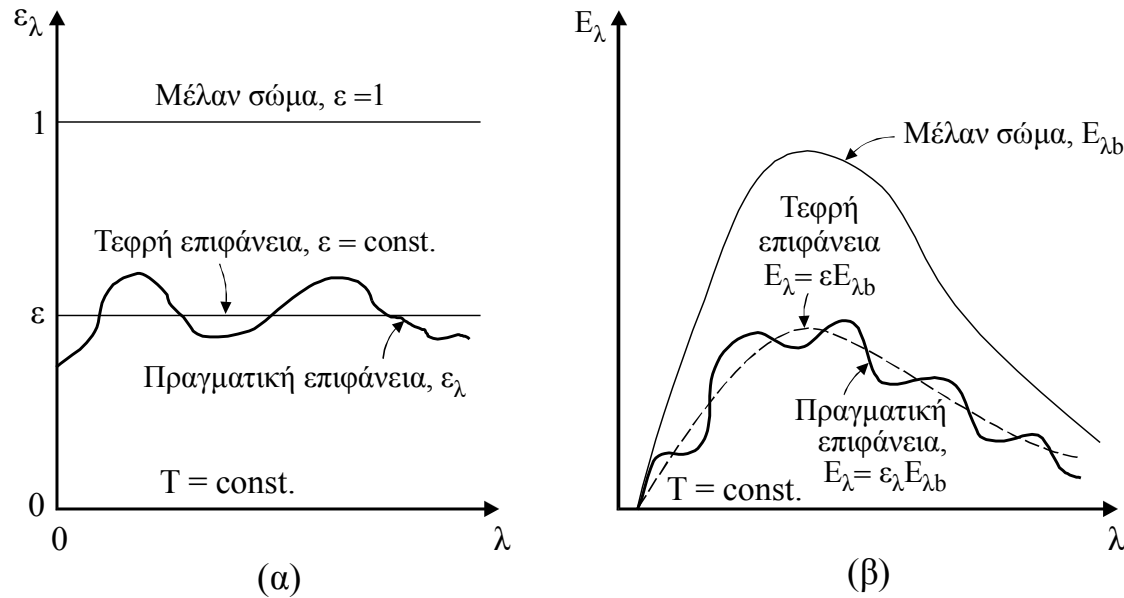


Εκπομπή από επιφάνεια (3/5)

- Προσεγγίσεις γκρίζας (ή τεφρής) και ισότροπης επιφάνειας. Μια επιφάνεια χαρακτηρίζεται σαν γκρίζα όταν οι ιδιότητές της είναι ανεξάρτητες του μήκους κύματος και ισότροπη όταν είναι ανεξάρτητες της διεύθυνσης. Θα είναι λοιπόν:
 - πραγματική επιφάνεια: $\epsilon_{\theta}, \epsilon_{\lambda} \neq ct$
 - ισότροπη επιφάνεια: $\epsilon_{\theta} = ct$
 - γκρίζα επιφάνεια: $\epsilon_{\lambda} = ct$
 - γκρίζα ισότροπη επιφάνεια: $\epsilon = \epsilon_{\lambda} = \epsilon_{\theta} = ct$



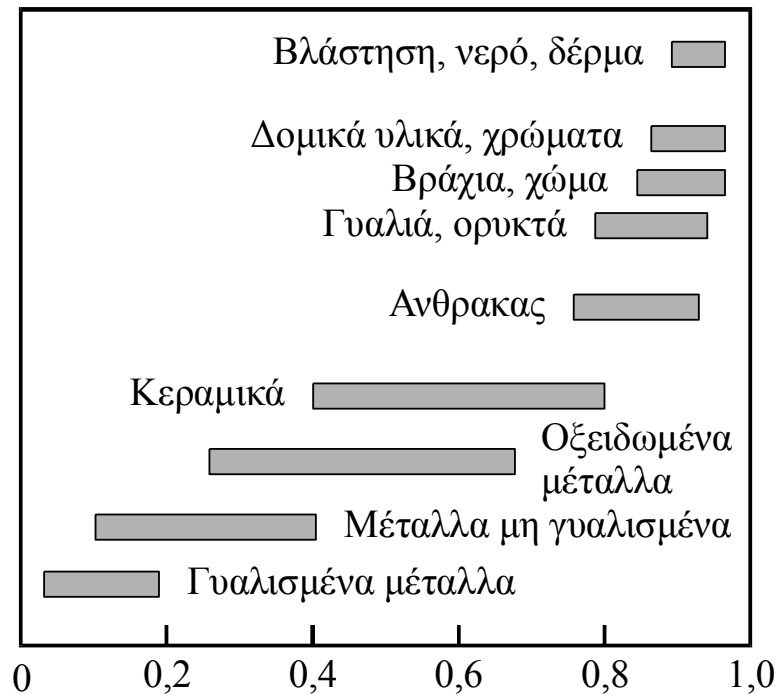
Εκπομπή από επιφάνεια (4/5)



- Σύγκριση μέλανος σώματος και πραγματικής και γκριζας επιφάνειας.
 - α. φασματικός συντελεστής εκπομπής
 - β. φασματική ισχύς εκπομπής



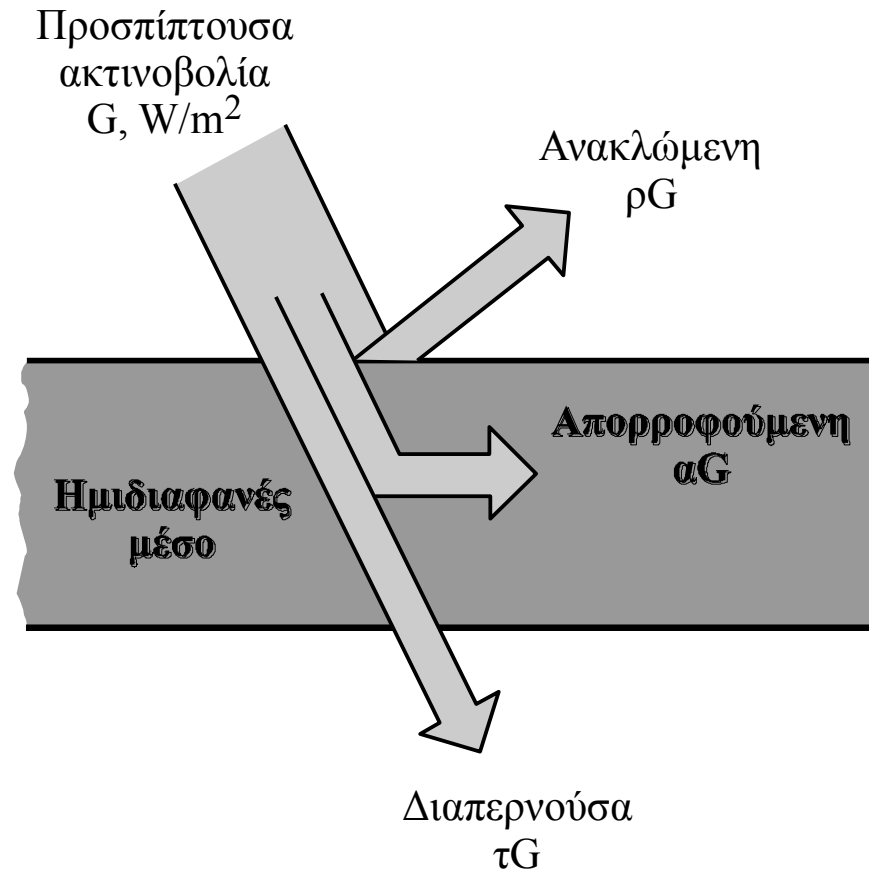
Εκπομπή από επιφάνεια (5/5)



- Τυπικές τιμές του ολικού συντελεστή εκπομπής.



Απορρόφηση, ανάκλαση και διαπερατότητα επιφάνειας



Εικόνα 5: Ανάκλαση, απορρόφηση και διαπερατότητα ακτινοβολίας σε ημιδιαφανές μέσο



Ακτινοβόληση

- *Ακτινοβόληση G*: η ακτινοβολούμενη ενέργεια που προσπίπτει σε μια επιφάνεια ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου.



Απορρόφηση, ανάκλαση και διαπερατότητα επιφάνειας

- Το ποσοστό της ακτινοβολήσης που απορροφάται από την επιφάνεια ονομάζεται *συντελεστής απορρόφησης* a , το ποσοστό που *ανακλάται* *συντελεστής ανάκλασης* ρ και το ποσοστό που διαπερνά την επιφάνεια *συντελεστής διαπερατότητας* τ . Θα είναι λοιπόν:

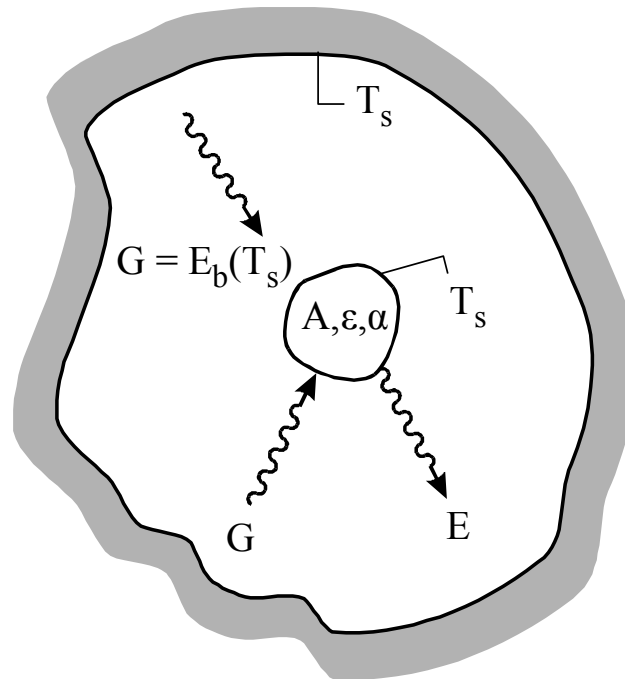
$$a = \frac{G_a}{G}, \quad 0 \leq a \leq 1$$

$$\rho = \frac{G_r}{G}, \quad 0 \leq \rho \leq 1$$

$$\tau = \frac{G_t}{G}, \quad 0 \leq \tau \leq 1$$



Ο νόμος του Kirchhoff (1/9)



Εικόνα 6: Συναλλαγή ακτινοβολίας σε ισοθερμική κοιλότητα



Ο νόμος του Kirchhoff (2/9)

- Ακτινοβολήση:

$$G = E_b (T_s) = \sigma T_s^4$$

- Η ακτινοβολία που απορροφά το αντικείμενο ανά μονάδα επιφάνειας θα είναι:

$$G_a = a G = a \sigma T_s^4$$

- ενώ η ακτινοβολία που εκπέμπεται απ' αυτό:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4$$



Ο νόμος του Kirchhoff (3/9)

- Λόγω της θερμικής ισορροπίας μεταξύ αντικειμένου και κοιλότητας, η ακτινοβολία που εκπέμπει το αντικείμενο θα πρέπει να είναι ίση μ' αυτήν που απορροφά, δηλαδή:

$$A \varepsilon \sigma T_s^4 = A a \sigma T_s^4$$

από την οποία προκύπτει:

$$\varepsilon = a$$

- Η σχέση αυτή είναι γνωστή ως *νόμος του Kirchhoff* (θα πρέπει η ακτινοβολήση να προέρχεται από μέλαν σώμα της ίδιας θερμοκρασίας με το ακτινοβολούμενο αντικείμενο).



Ο νόμος του Kirchhoff (4/9)

- Φασματική έκφραση του νόμου του Kirchhoff.

$$\varepsilon_{\lambda} = a_{\lambda}$$

- Για να ισχύσει θα πρέπει είτε η προσπίπτουσα ακτινοβολία είτε η ακτινοβολούμενη επιφάνεια να είναι ισότροπη.



Ο νόμος του Kirchhoff (5/9)

- Γωνιακή φασματική μορφή του νόμου του Kirchhoff: δεν υπάρχουν περιορισμοί:

$$\varepsilon_{\lambda,\theta} = a_{\lambda,\theta}$$

- Η γωνιακή φασματική μορφή ισχύει πάντοτε.



Ο νόμος του Kirchhoff (6/9)

- Η φασματική μορφή ισχύει όταν ισχύει μια από τις δύο παρακάτω προϋποθέσεις:
 - η προσπίπτουσα ακτινοβολία (ακτινοβολήση) να είναι ισότροπη.
 - η επιφάνεια να είναι ισότροπη, δηλαδή οι συντελεστές $\epsilon_{\lambda,\theta}$ και $a_{\lambda,\theta}$ να είναι ανεξάρτητοι της διεύθυνσης.

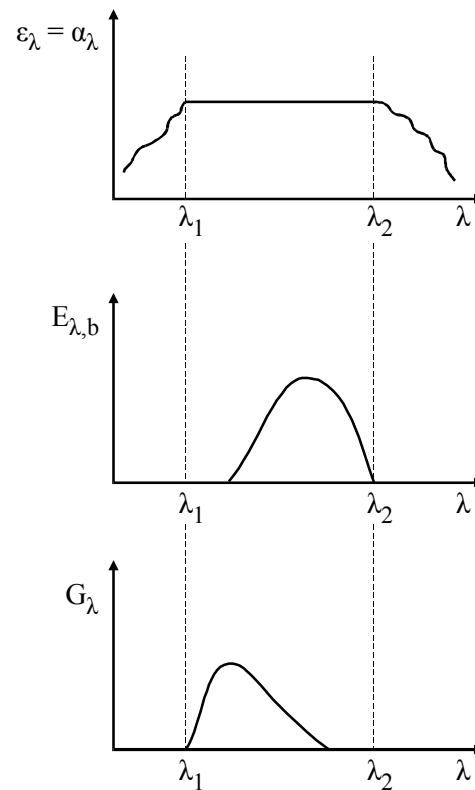


Ο νόμος του Kirchhoff (7/9)

- Αν μια από τις δύο παραπάνω συνθήκες ικανοποιείται, για να ισχύει η $\varepsilon = \alpha$ αρκεί να ικανοποιείται μια από τις δύο παρακάτω συνθήκες:
 - η προσπίπτουσα ακτινοβολία προέρχεται από εκπομπή μέλανος σώματος ίδιας θερμοκρασίας T_s με την επιφάνεια που δέχεται την ακτινοβολία.
 - η επιφάνεια να είναι γκριζα (τεφρή), δηλαδή οι συντελεστές ε_λ και α_λ είναι ανεξάρτητοι του μήκους κύματος λ .



Ο νόμος του Kirchhoff (8/9)



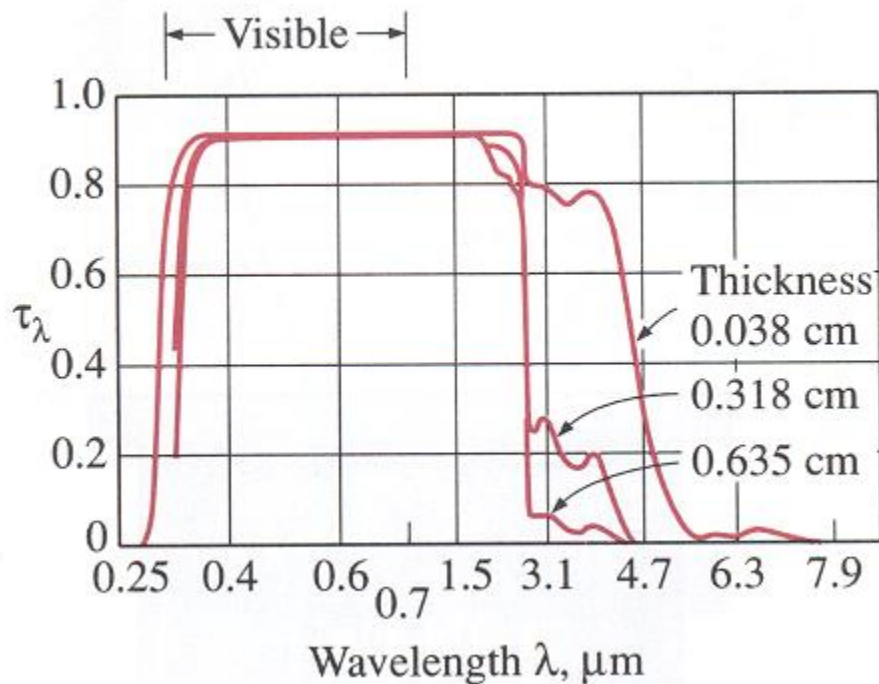
Ο νόμος του Kirchhoff (9/9)

- Χρησιμότητα:

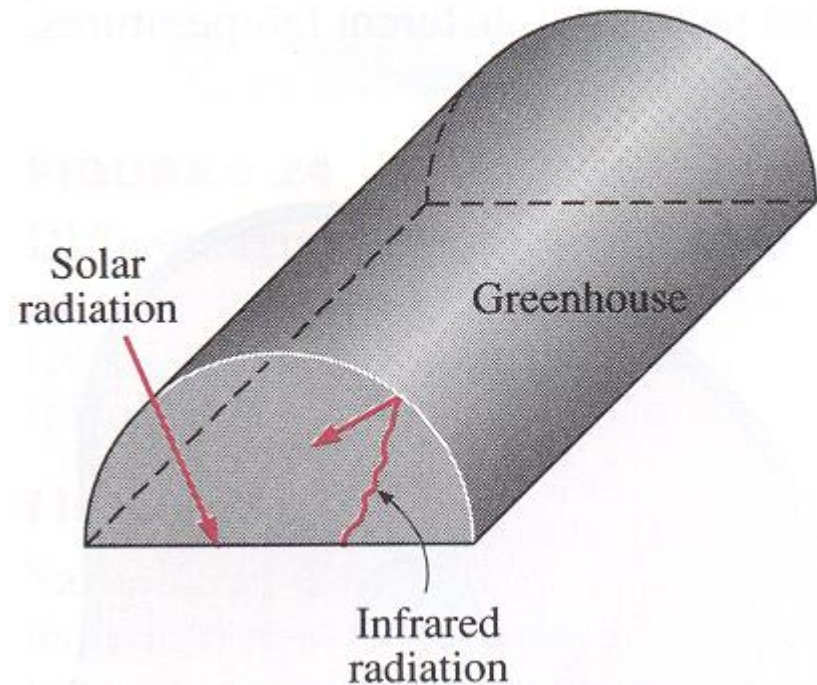
Η σχέση $\epsilon = \alpha$ μαζί με την $\rho = 1 - \alpha$ μας δίνει τη δυνατότητα να υπολογίσουμε και τις τρεις ιδιότητες μιας αδιαφανούς επιφάνειας αν γνωρίζουμε τη μια μόνο.



Φαινόμενο θερμοκηπίου



Εικόνα 7: Φασματική περατότητα του γυαλιού με χαμηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο σε θερμοκρασία δωματίου για διαφορετικές τιμές πάχους



Εικόνα 8: Ένα θερμοκήπιο παγιδεύει ενέργεια επιτρέποντας στην ηλιακή ακτινοβολία να εισέλθει σε αυτό, αλλά απαγορεύοντας στην υπέρυθρη ακτινοβολία να εξέλθει από αυτό



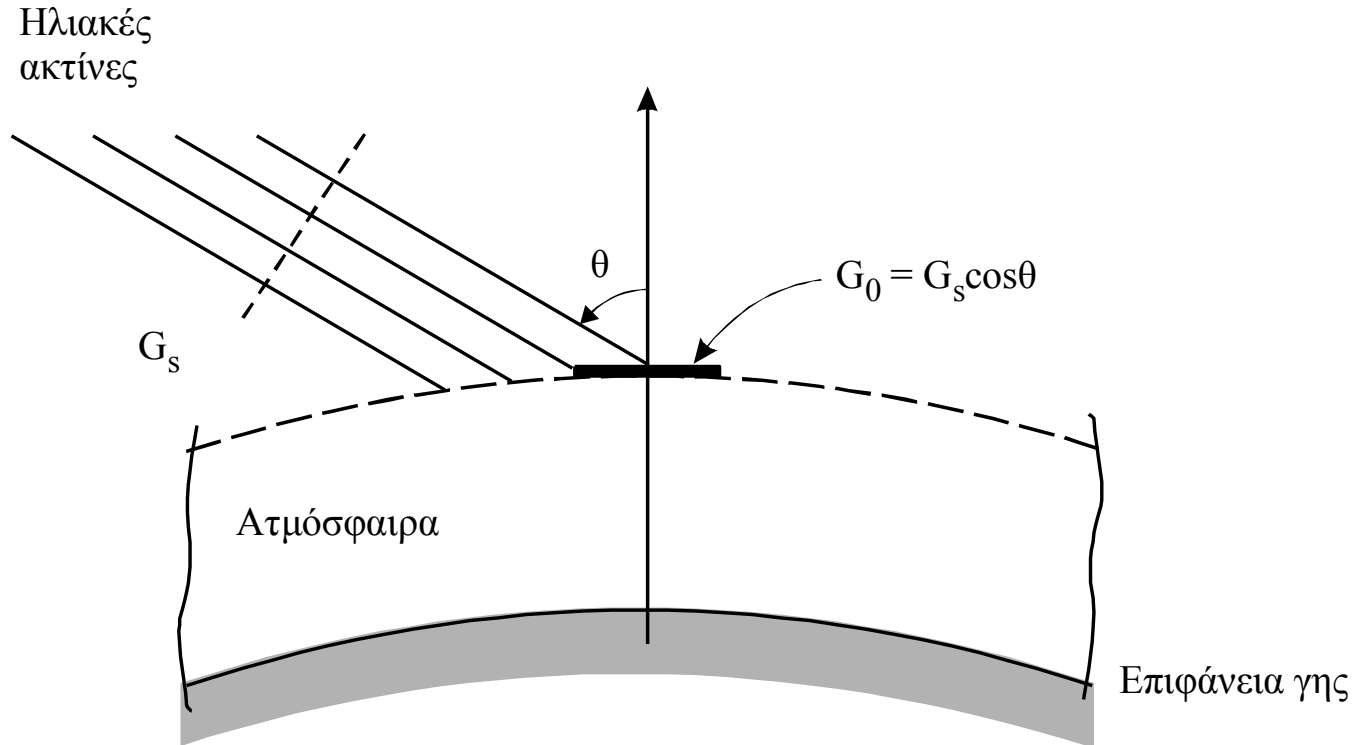
Ακτινοβολία περιβάλλοντος (1/2)

- Η ηλιακή ακτινοβολία, ουσιώδης παράγοντας της ζωής στον πλανήτη μας και η ατμοσφαιρική, που προέρχεται από τις εκπομπές ή ανακλάσεις ενέργειας από τα συστατικά της ατμόσφαιρας είναι οι δύο κυριότερες μορφές ακτινοβολίας του φυσικού μας περιβάλλοντος.
- Ο ρυθμός με τον οποίο η ηλιακή ενέργεια προσπίπτει σε μια επιφάνεια, κάθετη στις ηλιακές ακτίνες, που βρίσκεται στο εξωτερικό της ατμόσφαιρας και όταν η γη βρίσκεται στη μέση της απόσταση από τον ήλιο ονομάζεται ηλιακή σταθερά και έχει τιμή:

$$G_s = 1353 \text{ W / m}^2$$



Ακτινοβολία περιβάλλοντος (2/2)



Εικόνα 9: Ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης

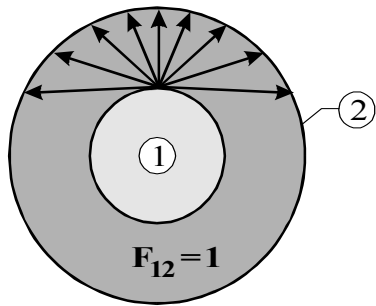


Συντελεστής Θέας (1/4)

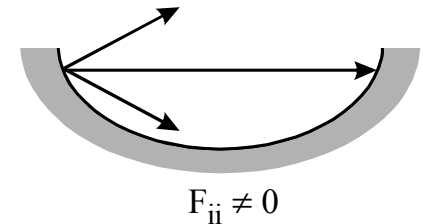
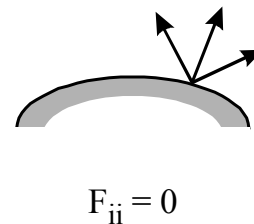
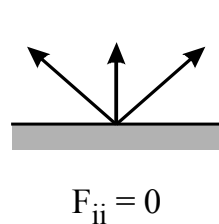
- Ορίζουμε σα *συντελεστή θέας* F_{ij} μιας επιφάνειας j από μια επιφάνεια i το ποσοστό της ακτινοβολίας που αποπέμπεται από την επιφάνεια i και συναντά την επιφάνεια j .



Συντελεστής θέας (2/4)



Εικόνα 10: Συντελεστής θέας σε σύστημα δύο ομόκεντρων σφαιρών



Εικόνα 11: Συντελεστής θέας επιφάνειας από τον εαυτό της



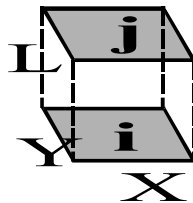
Συντελεστής θέας (3/4)

- Γεωμετρία

Σχέση

$$\bar{X} = X/L, \quad \bar{Y} = Y/L$$

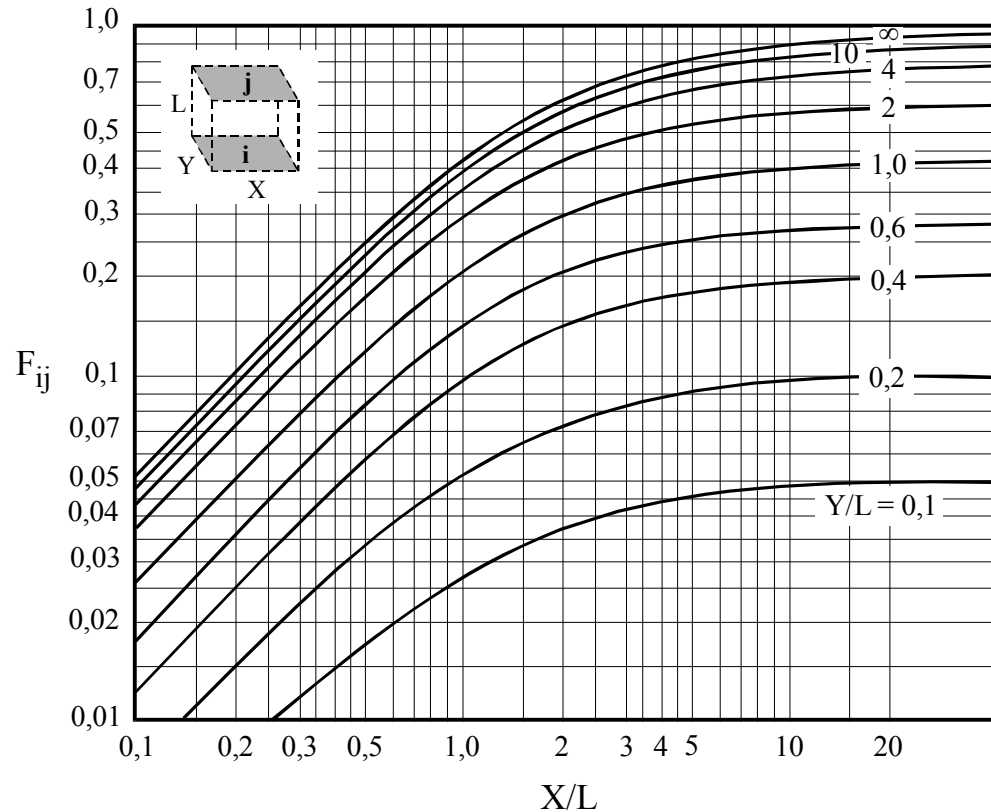
Επιφανειακή απόδοση



$$F_{i \rightarrow j} = \frac{2}{\pi \bar{X} \bar{Y}} \left\{ \ln \left[\frac{\left(1 + \bar{X}^2\right) \left(1 + \bar{Y}^2\right)}{1 + \bar{X}^2 + \bar{Y}^2} \right]^{1/2} + \bar{X} \left(1 + \bar{Y}^2\right)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{X}}{\left(1 + \bar{Y}^2\right)^{1/2}} + \bar{Y} \left(1 + \bar{X}^2\right)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{Y}}{\left(1 + \bar{X}^2\right)^{1/2}} - \bar{X} \tan^{-1} \bar{X} - \bar{Y} \tan^{-1} \bar{Y} \right\}$$



Συντελεστής θέας (4/4)



Εικόνα 12: Συντελεστής θέας για «ευθυγραμμισμένα» παράλληλα ορθογώνια



Σχέσεις μεταξύ των συντελεστών θέας (1/5)

- Για να υπολογισθεί η συναλλαγή ακτινοβολίας σε μια κλειστή κοιλότητα N επιφανειών απαιτείται, ο υπολογισμός N^2 συντελεστών θέας:

$$\begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & \cdots & F_{1N} \\ F_{21} & F_{22} & \cdots & F_{2N} \\ F_{N1} & F_{N2} & \cdots & F_{NN} \end{bmatrix}$$



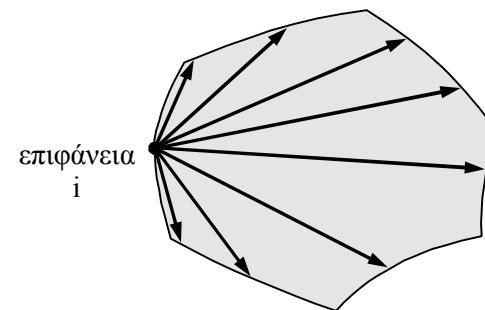
Σχέσεις μεταξύ των συντελεστών θέας (2/5)

- Σχέση αμοιβαιότητας

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$$

- Αθροιστική ιδιότητα

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1$$



Εικόνα 13: Συναλλαγή ακτινοβολίας σε κλειστό σύστημα επιφανειών



Σχέσεις μεταξύ των συντελεστών θέας (3/5)

- N συντελεστές θέας μπορούν να υπολογισθούν από τις N σχέσεις της αθροιστικής ιδιότητας.
- $N(N-1)/2$ συντελεστές υπολογίζονται από τις $N(N-1)/2$ εφαρμογές της σχέσης αμοιβαιότητας.
- Άρα απαιτείται ο άμεσος υπολογισμός μόνο συντελεστών θέας.

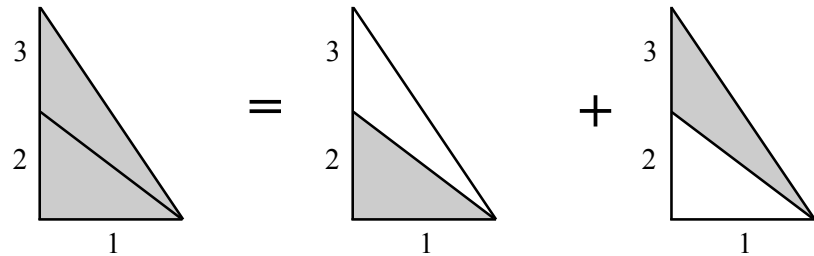
$$\left[N^2 - N - N(N-1)/2 \right] = N(N-1)/2$$



Σχέσεις μεταξύ των συντελεστών θέας (4/5)

- *Ο κανόνας της υπέρθεσης: ο συντελεστής θέας από μια επιφάνεια i προς μια επιφάνεια j η οποία διαιρείται σε n τμήματα είναι ίσος με το άθροισμα των συντελεστών θέας από την επιφάνεια i προς τα n τμήματα της επιφάνειας j . Είναι δηλαδή:*

$$F_{i(j)} = \sum_{k=1}^n F_{ik}$$



$$F_{1,(2,3)} = F_{12} + F_{13}$$

- Το αντίστροφο δεν ισχύει.

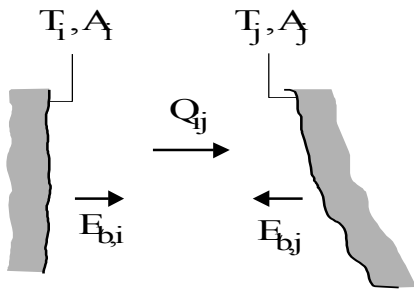


Σχέσεις μεταξύ των συντελεστών θέας (5/5)

- Ο κανόνας της συμμετρίας: δύο (ή περισσότερες) επιφάνειες που είναι σε συμμετρικές θέσεις ως προς τρίτη επιφάνεια, έχουν ίδιους συντελεστές θέας από την τρίτη αυτή επιφάνεια. Αν δηλαδή οι επιφάνειες j και k είναι συμμετρικές ως προς την επιφάνεια i , τότε: $F_{ij}=F_{ik}$. Από τη σχέση αμοιβαιότητας προκύπτει: $F_{ji}=F_{ki}$.



Συναλλαγή θερμικής ακτινοβολίας μεταξύ μελανών επιφανειών (1/2)



Εικόνα 14: Συναλλαγή θερμικής ακτινοβολίας μεταξύ δύο τυχαίων επιφανειών μελανών σωμάτων

$$\dot{q}_{ij} = A_i F_{ij} E_{b,i} = A_i F_{ij} \sigma T_i^4 \quad (\text{W})$$

$$\dot{q}_{ji} = A_j F_{ji} E_{b,j} = A_j F_{ji} \sigma T_j^4 \quad (\text{W})$$

$$\dot{Q}_{ij} = \dot{q}_{ij} - \dot{q}_{ji} = A_i F_{ij} \sigma T_i^4 - A_j F_{ji} \sigma T_j^4$$

- Η παραπάνω σχέση χρησιμοποιώντας την αρχή της αμοιβαιότητας γράφεται:

$$\dot{Q}_{ij} = A_i F_{ij} \sigma (T_i^4 - T_j^4) \quad (\text{W})$$



Συναλλαγή θερμικής ακτινοβολίας μεταξύ μελανών επιφανειών (2/2)

- Σε ένα κλειστό σύστημα N επιφανειών μελανών σωμάτων με διαφορετικές θερμοκρασίες, η καθαρή μεταφορά (απώλεια) ισχύος της επιφάνειας i λόγω συναλλαγής με τις υπόλοιπες επιφάνειες θα είναι:

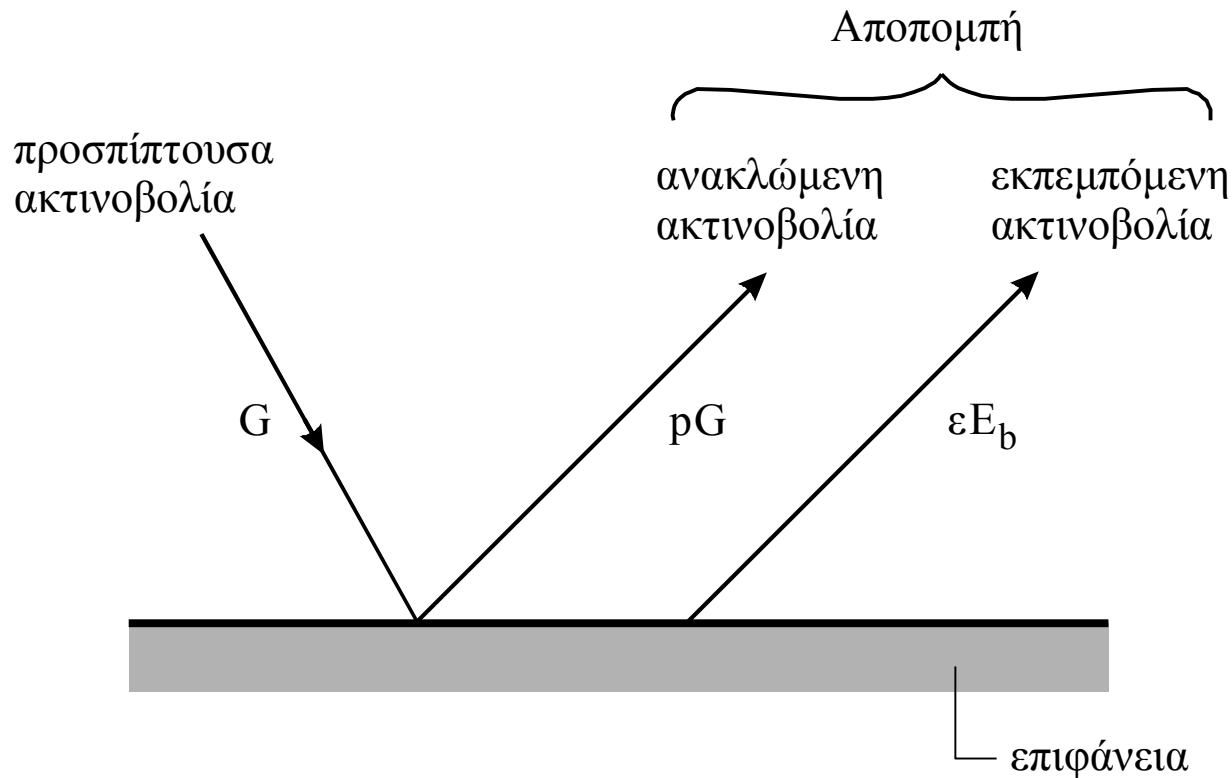
$$\dot{Q}_i = \sum_{j=1}^N Q_{ij} = \sum_{j=1}^N A_i F_{ij} \sigma (T_i^4 - T_j^4) \quad (W)$$

– Αν $Q_i < 0$ τότε η επιφάνεια i κερδίζει ισχύ.



Συναλλαγή θερμικής ακτινοβολίας μεταξύ τεφρών, ισότροπων επιφανειών

- Αποπομπή



Εικόνα 15: Αποπομπή επιφάνειας

Αποπομπή (1/2)

- *Αποπομπή J*: η ενέργεια που ακτινοβολεί μια επιφάνεια ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας. Προφανώς είναι το άθροισμα της ακτινοβολίας που εκπέμπει η επιφάνεια και της ακτινοβολίας που ανακλά.



Αποπομπή (2/2)

- Για μια τεφρή και αδιαφανή επιφάνεια

$$(\varepsilon_i = a_i \quad \text{και} \quad a_i + \rho_i = 1)$$

θα είναι:

$$\begin{aligned} J_i &= E_i + \rho G_i = \varepsilon_i E_{b,i} + \rho G_i = \\ &= \varepsilon_i E_{b,i} + (1 - \varepsilon_i) G_i \quad (\text{W/m}^2) \end{aligned}$$

- Για μέλαν σώμα, επειδή $\varepsilon_i = 1$

$$J_i = E_{b,i} = \sigma T_i^4$$



Καθαρή συναλλαγή ακτινοβολίας σε μια επιφάνεια

- Η καθαρή συναλλαγή θερμικής ακτινοβολίας Q_i μιας επιφάνειας A_i είναι η διαφορά της ενέργειας που ακτινοβολείται από την επιφάνεια και αυτής που προσπίπτει σ' αυτή:

$$\dot{Q}_i = A_i (J_i - G_i) \quad (\text{W})$$

- Προκύπτει:

$$\dot{Q}_i = A_i \left(J_i - \frac{J_i - \varepsilon_i E_{b,i}}{1 - \varepsilon_i} \right) = \frac{A_i \varepsilon_i}{1 - \varepsilon_i} (E_{b,i} - J_i) \quad (\text{W})$$



Καθαρή συναλλαγή ακτινοβολίας μεταξύ επιφανειών (1/3)

- Από την αποπομπή $A_i J_i$ ισχύος από ολόκληρη την i προσπίπτει στην j ισχύς $A_i F_{ij} J_i$. Από την αποπομπή $A_j J_j$ ισχύος από ολόκληρη την j προσπίπτει στην i ισχύς $A_j F_{ji} J_j$. Η καθαρή απομάκρυνση ισχύος από την i λόγω συναλλαγής με την j είναι:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{ij} &= A_i F_{ij} J_i - A_j F_{ji} J_j = A_i F_{ij} J_i - A_i F_{ij} J_j = \\ &= A_i F_{ij} (J_i - J_j) \quad (\text{W})\end{aligned}$$



Καθαρή συναλλαγή ακτινοβολίας μεταξύ επιφανειών (2/3)

- Σ' ένα κλειστό σύστημα N επιφανειών, η καθαρή απομάκρυνση ισχύος από την επιφάνεια i θα είναι το άθροισμα των καθαρών μεταφορών ισχύος από την i προς όλες τις επιφάνειες $j = 1, 2, \dots, N$.

$$\dot{Q}_i = \sum_{j=1}^N \dot{Q}_{ij} = \sum_{j=1}^N A_i F_{ij} (J_i - J_j) \quad (W)$$



Καθαρή συναλλαγή ακτινοβολίας μεταξύ επιφανειών (3/3)

- Άρα:

$$\frac{\varepsilon_i}{1 - \varepsilon_i} A_i (E_{b,i} - J_i) = \sum_{j=1}^N A_i F_{ij} (J_i - J_j)$$

- Αν την εφαρμόσουμε N φορές ($i=1,2,\dots,N$) έχουμε ένα σύστημα N γραμμικών εξισώσεων με N αγνώστους, τις αποπομπές J_1, J_2, \dots, J_N . Αν είναι γνωστές οι θερμοκρασίες T_i των επιφανειών, είναι γνωστές και εκπεμπόμενες ισχύεις $E_{b,i}$, οπότε η επίλυση του συστήματος δίνει τις J_i .



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (1/4)

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

- Εικόνα 1:

Ψύξη στερεού με ακτινοβολία σε θάλαμο κενού: Σελίδα 173, Εισαγωγή στη Μετάδοση Θερμότητας, Βασίλης Χατζηαθανασίου, εκδόσεις Σοφία

- Εικόνα 2:

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα: Σελίδα 174, Εισαγωγή στη Μετάδοση Θερμότητας, Βασίλης Χατζηαθανασίου, εκδόσεις Σοφία

- Εικόνα 3:

Ισοθερμοκρασιακή κοιλότητα – προσέγγιση μέλανος σώματος: Σελίδα 177, Εισαγωγή στη Μετάδοση Θερμότητας, Βασίλης Χατζηαθανασίου, εκδόσεις Σοφία

- Εικόνα 4:

Φασματική ισχύς εκπομπής μέλανος σώματος: Σελίδα 768, Μεταφορά Μάζας και Θερμότητας, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (2/4)

- Εικόνα 5:

Ανάκλαση, απορρόφηση και διαπερατότητα ακτινοβολίας σε ημδιαφανές μέσο: Σελίδα 786, Μεταφορά Μάζας και Θερμότητας, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα

- Εικόνα 6:

Συναλλαγή ακτινοβολίας σε ισοθερμική κοιλότητα: Σελίδα 189, Εισαγωγή στη Μετάδοση Θερμότητας, Βασίλης Χατζηαθανασίου, εκδόσεις Σοφία

- Εικόνα 7:

Φασματική περατότητα του γυαλιού με χαμηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο σε θερμοκρασία δωματίου για διαφορετικές τιμές πάχους: Σελίδα 790, Μεταφορά Μάζας και Θερμότητας, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα

- Εικόνα 8:

Ένα θερμοκήπιο παγιδεύει ενέργεια επιτρέποντας στην ηλιακή ακτινοβολία να εισέλθει σε αυτό, αλλά απαγορεύοντας στην υπέρυθη ακτινοβολία να εξέλθει από αυτό: Σελίδα 790, Μεταφορά Μάζας και Θερμότητας, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (3/4)

- Εικόνα 9:

Ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης: Σελίδα 192, Εισαγωγή στη Μετάδοση θερμότητας, Βασίλης Χατζηαθανασίου, εκδόσεις Σοφία

- Εικόνα 10:

Συντελεστής θέας σε σύστημα δύο ομόκεντρων σφαιρών: Σελίδα 196, Εισαγωγή στη Μετάδοση θερμότητας, Βασίλης Χατζηαθανασίου, εκδόσεις Σοφία

- Εικόνα 11:

Συντελεστής θέας επιφάνειας από τον εαυτό της: Σελίδα 197, Εισαγωγή στη Μετάδοση θερμότητας, Βασίλης Χατζηαθανασίου, εκδόσεις Σοφία

- Εικόνα 12:

Συντελεστής θέας για «ευθυγραμμισμένα» παράλληλα ορθογώνια: Σελίδα 200, Εισαγωγή στη Μετάδοση θερμότητας, Βασίλης Χατζηαθανασίου, εκδόσεις Σοφία



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (4/4)

- Εικόνα 13:

Συναλλαγή ακτινοβολίας σε κλειστό σύστημα επιφανειών: Σελίδα 202, Εισαγωγή στη Μετάδοση Θερμότητας, Βασίλης Χατζηαθανασίου, εκδόσεις Σοφία

- Εικόνα 14:

Συναλλαγή θερμικής ακτινοβολίας μεταξύ δύο τυχαίων επιφανειών μελανών σωμάτων: Σελίδα 207, Εισαγωγή στη Μετάδοση Θερμότητας, Βασίλης Χατζηαθανασίου, εκδόσεις Σοφία

- Εικόνα 15:

Αποπομπή επιφάνειας: Σελίδα 210, Εισαγωγή στη Μετάδοση Θερμότητας, Βασίλης Χατζηαθανασίου, εκδόσεις Σοφία



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Χατζηαθανασίου Βασίλειος, Καδή Στυλιανή. «ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ. Ακτινοβολία».
Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:
<http://eclass.auth.gr/courses/OCRS421/>.



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

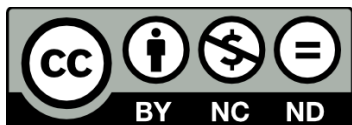
[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>





Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: Σβάρνα Κωνσταντίνα
Θεσσαλονίκη, Εαρινό εξάμηνο 2014-2015





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.

