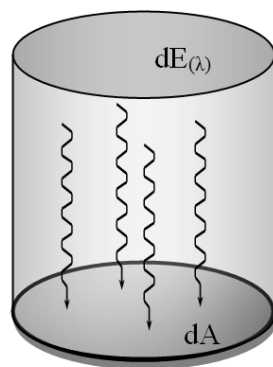


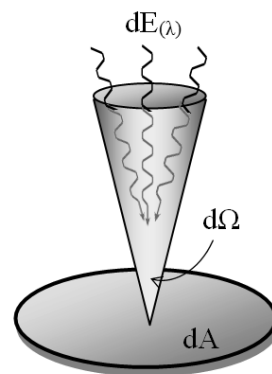
Ροή ακτινοβολίας, F (irradiance) σε μια διεύθυνση ορίζεται το ποσό της ενέργειας dE ακτινοβολίας από μια δέσμη παράλληλων ακτινών, που διέρχεται σε χρόνο dt μέσα από μία στοιχειώδη επιφάνεια dA , η οποία είναι τοποθετημένη κάθετα στη διεύθυνση αυτή και δίνεται από τη σχέση:

$$F = \frac{dE}{dA dt}$$

Η ροή έχει μονάδα ισχύος στη μονάδα της επιφάνειας και εκφράζεται συνήθως σε W/m^2 .



(α)



(β)

Ο προηγούμενος ορισμός αναφέρεται σε ροή ακτινοβολίας για όλα τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας, για το λόγο αυτό η ροή αυτή F καλείται και **ολική ή ολοφασματική ροή (total irradiance)**.

Αν θεωρήσουμε ακτινοβολία μήκους κύματος μεταξύ λ και $d\lambda$ τότε το προηγούμενο μέγεθος αναφέρεται ως **φασματική ροή ακτινοβολίας**, $F_{(\lambda)}$ (*spectral irradiance*):

$$F_{(\lambda)} = \frac{dE_{(\lambda)}}{dA dt d\lambda}$$

με μονάδα μέτρησης το $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$.

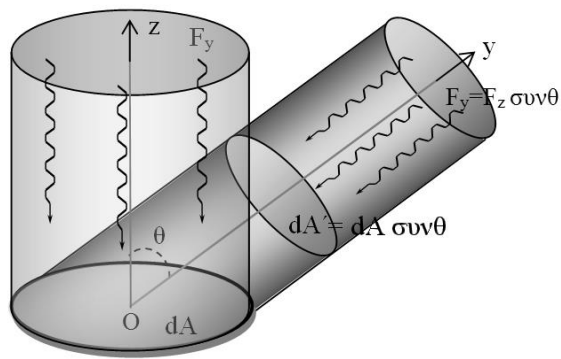
Η ολοκλήρωση της φασματικής ροής ακτινοβολίας $F_{(\lambda)}$ για όλα τα μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος μας δίνει την **ολική ή ολοφασματική ροή** F :

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

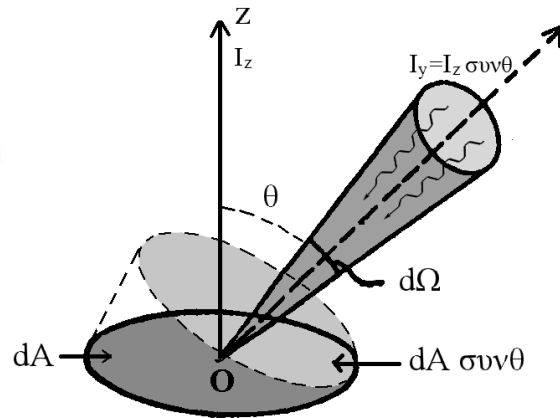
Γενικά η ροή σε ένα σημείο O για διάφορες διευθύνσεις είναι διαφορετική. **Ο νόμος του συνημιτόνου του Lambert** συνδέει τη ροή της ακτινοβολίας F_z σε μια διεύθυνση Oz , με τη ροή F_y της ίδιας ακτινοβολίας σε μια τυχαία διεύθυνση O . Δίνεται από τη σχέση:

$$F_y = F_z \cos\theta$$

όπου θ η γωνία μεταξύ των δυο διευθύνσεων Oy και Oz .



(α)



(β)

Ο ορισμός της ροής είναι επαρκής για την εκτίμηση της ενέργειας που μεταφέρεται από μια δέσμη παράλληλων ακτινών.

Όταν όμως η ακτινοβολία διαδίδεται σε διάφορες διευθύνσεις τότε χρησιμοποιείται το μέγεθος της έντασης ακτινοβολίας.

Ένταση ακτινοβολίας, I (*radiative intensity or radiance*) σε μια διεύθυνση ορίζεται το ποσό της ενέργειας dE ακτινοβολίας που διέρχεται σε χρόνο dt μέσα σε στερεά γωνία $d\Omega$, μέσα από μία στοιχειώδη επιφάνεια dA , η οποία είναι τοποθετημένη κάθετα στη διεύθυνση αυτή. Δίνεται από τη σχέση:

$$I = \frac{dE}{dt d\Omega dA}$$

με μονάδα μέτρησης το $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$.

Ο προηγούμενος ορισμός αναφέρεται στην **ολική ή ολοφασματική ένταση ακτινοβολίας I** (*total radiance*), δηλ. στην ένταση ακτινοβολίας για όλα τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας.

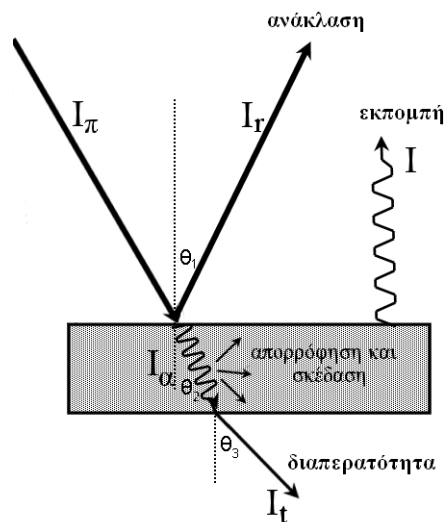
Αν θεωρήσουμε ακτινοβολία μήκους κύματος μεταξύ λ και $d\lambda$ τότε το προηγούμενο μέγεθος αναφέρεται ως **φασματική ή ειδική ένταση ακτινοβολίας, $I_{(\lambda)}$** (*specific radiative intensity or spectral radiance*):

$$I_{(\lambda)} = \frac{dE_{(\lambda)}}{dt d\Omega dA d\lambda}$$

με μονάδα μέτρησης το $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$.

Αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη

Όταν μια ακτινοβολία προσπίπτει σε ένα υλικό σώμα, τότε ένα μέρος αυτής απορροφάται από αυτό, ένα άλλο μέρος ανακλάται από το σώμα και το υπόλοιπο μέρος διέρχεται μέσα από αυτό. Παράλληλα το σώμα εκπέμπει ακτινοβολία. Οι διεργασίες αυτές περιγράφονται αμέσως παρακάτω:



Ανάκλαση, εκπομπή, απορρόφηση και διαπερατότητα της ακτινοβολίας.

Εκπομπή

Κάθε υλικό σώμα ακτινοβολεί ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Το φαινόμενο αυτό καλείται ***εκπομπή (emission)*** ακτινοβολίας.

Η ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας εξαρτάται από τη *θερμοκρασία* του σώματος. Όσο πιο θερμό είναι ένα σώμα τόσο πιο έντονα ακτινοβολεί και μάλιστα σε πιο μικρά μήκη κύματος. Εκτός όμως από τη θερμοκρασία η ένταση της ακτινοβολίας ενός σώματος εξαρτάται και από τη *φύση* του σώματος.

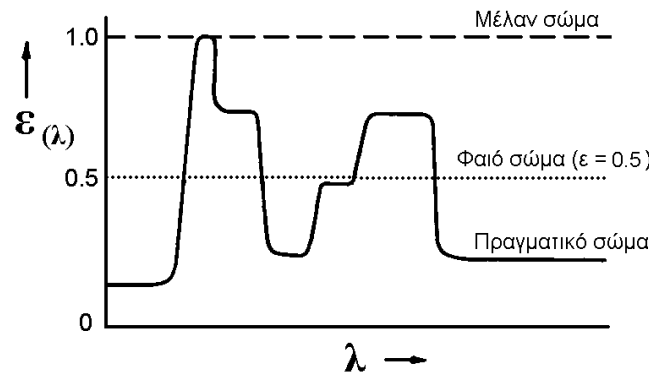
Για τη μελέτη της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα υλικό σώμα χρησιμοποιείται η έννοια του μέλανος (μαύρου) σώματος. ***Μέλαν σώμα (blackbody)*** είναι το υποθετικό σώμα το οποίου η ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, σε κάθε μήκος κύματος και σε κάθε θερμοκρασία, είναι η μέγιστη δυνατή.

Το μέλαν σώμα απορροφά πλήρως την ακτινοβολία όλων των μηκών κύματος που προσπίπτει σε αυτό και είναι ισότροπη πηγή δηλ. εκπέμπει σταθερή ένταση ακτινοβολίας προς όλες τις διευθύνσεις.

Τα περισσότερα υλικά σώματα δεν συμπεριφέρονται ως μέλανα σώματα. Για το λόγο αυτό εισάγεται η έννοια του συντελεστή εκπομπής, ο οποίος εκφράζει την ικανότητα του πραγματικού σώματος να εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε σχέση με αυτή του μέλανος σώματος.

Ο *συντελεστής εκπομπής* $\epsilon(\lambda)$ (*emissivity*) ενός πραγματικού σώματος για ένα ορισμένο μήκος κύματος λ , ορίζεται από το πηλίκο της έντασης ακτινοβολίας $I(\lambda)$ που εκπέμπει το σώμα σε θερμοκρασία T , προς την ένταση ακτινοβολίας $I_{M(\lambda)}$ του ιδίου μήκους κύματος που εκπέμπει το μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία.

Ο συντελεστής εκπομπής εξαρτάται από τη θερμοκρασία του σώματος, το μήκος κύματος και τη διεύθυνση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Το εύρος των τιμών του κυμαίνεται από 0 έως 1. Εξ ορισμού ο συντελεστής εκπομπής του μέλανος σώματος είναι ίσος με τη μονάδα για όλα τα μήκη κύματος, ενώ ο συντελεστής εκπομπής ενός πραγματικού σώματος είναι συνάρτηση του μήκους κύματος και έχει τιμή μικρότερη της μονάδας.



Η φασματική κατανομή της ικανότητας εκπομπής $\epsilon(\lambda)$ μέλανος, πραγματικού και φαιού σώματος (Πηγή: Lillesand and Kiefer, 1979).

Ο ολικός ή ολοφασματικός συντελεστής εκπομπής $\epsilon_{ολ}$ αναφέρεται στην ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα πραγματικό σώμα θερμοκρασίας T σε όλα τα μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\epsilon_{ολ} = \frac{\int_0^{\infty} I_{(\lambda)} d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{M(\lambda)} d\lambda} = \frac{I}{I_M}$$

όπου I η ολική ένταση ακτινοβολίας που εκπέμπει το πραγματικό σώμα δηλ. για όλα τα μήκη κύματος σε θερμοκρασία T , και I_M η ολική ένταση ακτινοβολίας που εκπέμπει το μέλαν σώμα, στην ίδια θερμοκρασία.

Στην πραγματικότητα τα υλικά σώματα δεν συμπεριφέρονται ως μέλανα σώματα, καθώς έχουν συντελεστή εκπομπής η τιμή του οποίου είναι μικρότερη της μονάδος σε διάφορα μήκη κύματος.

Ανάλογα όμως με την περίπτωση μπορούν να γίνουν ορισμένες προσεγγίσεις. Για παράδειγμα, ο ήλιος μπορεί να θεωρηθεί μέλαν σώμα.

Ένα πραγματικό όμως σώμα μπορεί να συμπεριφέρεται ως μέλαν σώμα σε ορισμένα μόνο μήκη κύματος.

Για παράδειγμα, τα περισσότερα σώματα στη γη συμπεριφέρονται ως μέλανα σώματα στην περιοχή του θερμικού υπέρυθρου (10-12 μm).

Ορίζουμε ως **φαιό σώμα** (*graybody*) ένα πραγματικό σώμα το οποίο έχει σταθερή ικανότητα εκπομπής $\epsilon(\lambda)$ για όλα τα μήκη κύματος, με τιμή μικρότερη της μονάδας.

Απορρόφηση

Όταν η ακτινοβολία προσπίπτει σε ένα σώμα, τότε ένα μέρος αυτής απορροφάται με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του σώματος αυξάνεται. Το φαινόμενο αυτό καλείται *απορρόφηση (absorption)* της ακτινοβολίας.

Το ποσό της ακτινοβολίας που απορροφάται από ένα σώμα εξαρτάται από τη *θερμοκρασία* του σώματος, τη *φύση* του υλικού και το *μήκος κύματος* της ακτινοβολίας. Το μέλαν σώμα απορροφά πλήρως την ακτινοβολία όλων των μηκών κύματος.

Τα πετρώματα της γης είναι καλοί απορροφητές σε αντίθεση με το χιόνι και τον πάγο. Ιδιαίτερα, το χρώμα του σώματος παίζει σημαντικό ρόλο στην απορρόφηση της ακτινοβολίας στο ορατό φάσμα. Είναι γνωστό ότι τα σώματα με σκούρο χρώμα είναι καλύτεροι απορροφητές της ορατής ακτινοβολίας από τα σώματα με ανοικτά χρώματα.

Ο **συντελεστής απορρόφησης** $\alpha(\lambda)$ (*absorptivity*) ενός πραγματικού σώματος, για ένα ορισμένο μήκος κύματος λ , εκφράζει το ποσοστό της ακτινοβολίας που απορροφά το σώμα, όταν η ακτινοβολία προσπέσει σε αυτό. Ορίζεται από το πηλίκο της έντασης ακτινοβολίας $I_{\alpha(\lambda)}$ που απορροφά το σώμα, προς την ένταση της προσπίπτουσας σε αυτό ακτινοβολίας $I_{\pi(\lambda)}$:

$$\alpha(\lambda) = \frac{I_{\alpha(\lambda)}}{I_{\pi(\lambda)}}$$

Κατ' αναλογία με τον ολικό συντελεστή εκπομπής ορίζεται και ο *ολικός ή ολοφασματικός συντελεστής απορρόφησης* $\alpha_{ολ}$ ο οποίος αναφέρεται στο ποσοστό της ακτινοβολίας που απορροφάται από ένα πραγματικό σώμα σε όλα τα μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος:

$$\alpha_{ολ} = \frac{\int_0^{\infty} I_{\alpha(\lambda)} d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{\pi(\lambda)} d\lambda} = \frac{I_{\alpha}}{I_{\pi}}$$

όπου I_{π} η ολική ένταση ακτινοβολίας που προσπίπτει στο σώμα δηλ. για όλα τα μήκη κύματος, και I_{α} η ολική ένταση ακτινοβολίας που απορροφά το σώμα.

Διαπερατότητα

Στην περίπτωση που το σώμα είναι διαφανές στην προσπίπτουσα ακτινοβολία τότε ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας διέρχεται μέσα από το σώμα. Το φαινόμενο αυτό καλείται *διαπερατότητα (transmission)*.

Η διαπερατότητα ενός σώματος μετράται με το *συντελεστή διαπερατότητας $t_{(\lambda)}$* ο οποίος εκφράζει το ποσοστό της ακτινοβολίας που διαπερνά ένα σώμα, σε σχέση με την ακτινοβολία που δέχεται. Ορίζεται ως:

$$\alpha_{(\lambda)} = \frac{I_{t(\lambda)}}{I_{\pi(\lambda)} - I_{r(\lambda)}}$$

όπου $I_{\pi(\lambda)}$ η προσπίπτουσα στο σώμα ακτινοβολία και $I_{r(\lambda)}$ η ανακλώμενη ακτινοβολία.

Η διαπερατότητα ενός σώματος εξαρτάται εκτός από τη φύση του σώματος και από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.

Η ατμόσφαιρα, για παράδειγμα, είναι αρκετά διαπερατή στην ηλιακή ακτινοβολία ενώ αντίθετα η διαπερατότητα της σε ορισμένα μήκη κύματος στην περιοχή του θερμικού υπέρυθρου είναι μηδενική.

Σχέση μεταξύ των συντελεστών εκπομπής, διαπερατότητας και ανάκλασης

Οι συντελεστές εκπομπής ε , διαπερατότητας t και ανάκλασης r συνδέονται με τη σχέση:

$$\varepsilon = (1-t)(1-r)$$

Για πλήρως αδιαφανή σώματα, όπως είναι η επιφάνεια της γης, είναι $t = 0$, οπότε ισχύει:

$$\varepsilon = 1 - r$$

Η προηγούμενη σχέση ερμηνεύεται ως εξής: ένας καλός ανακλαστήρας είναι κακός πομπός ακτινοβολίας και αντίστροφα.

Νόμοι της ακτινοβολίας

Ο νόμος του *Planck* δίνει τη σχέση της ειδικής έντασης ακτινοβολίας του μέλανος σώματος ($I_{(\lambda)M}$) με την θερμοκρασία του T και το μήκος κύματος λ της ακτινοβολίας. Ο νόμος του *Planck* εκφράζεται από τη σχέση:

$$I_{(\lambda)M} = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)}$$

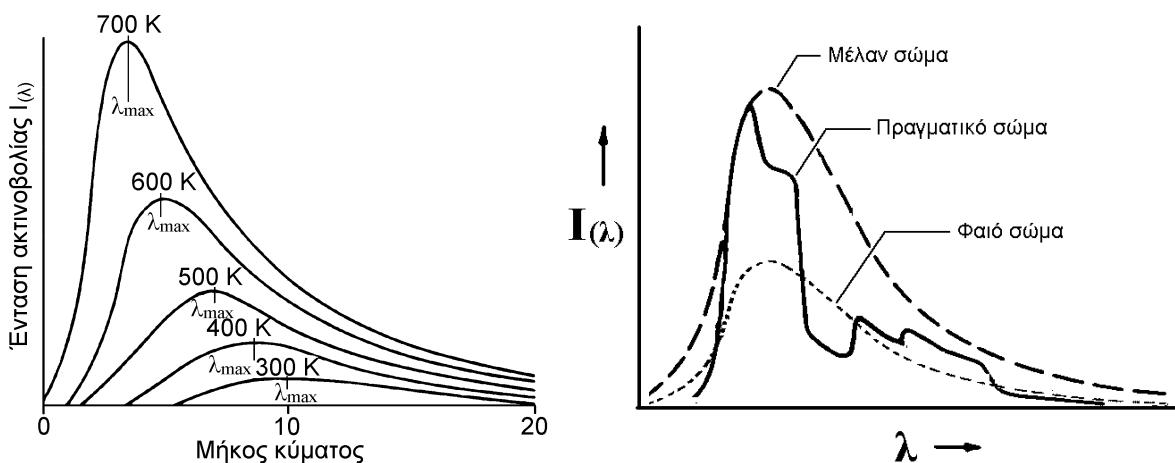
όπου $c_1 = 3.7 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^2$ και $c_2 = 1.43 \cdot 10^{-2} \text{ m K}$.

Τα πραγματικά σώματα, όπως η γη και τα περισσότερα σώματα στη γη, δεν συμπεριφέρονται ως μέλανα σώματα διότι η ικανότητα εκπομπής της μεταβάλλεται με το μήκος κύματος, επηρεάζοντας έτσι την ολική ροή της ακτινοβολίας F .

Συγκεκριμένα, η ειδική ένταση της ακτινοβολίας $I(\lambda)$ ενός πραγματικού σώματος, με μήκος κύματος λ , εξαρτάται από την θερμοκρασία T , το μήκος κύματος λ της ακτινοβολίας και την ικανότητα εκπομπής $\epsilon(\lambda)$ στο συγκεκριμένο μήκος κύματος λ , σύμφωνα με την σχέση:

$$I(\lambda) = \epsilon(\lambda) I_{(\lambda)M} = \epsilon(\lambda) \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)}$$

Η φασματική κατανομή της έντασης ακτινοβολίας μέλανος, φαιού και ενός πραγματικού σώματος παρουσιάζεται ποιοτικά στην Εικόνα που ακολουθεί:



Η ικανότητα εκπομπής $\varepsilon(\lambda)$ ενός σώματος, για ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος λ , αλλάζει με τη θερμοκρασία του.

Το έδαφος της γης δεν συμπεριφέρεται ως μέλαν σώμα γιατί η ικανότητα εκπομπής του $\varepsilon(\lambda)$ διαφέρει στα διάφορα μήκη κύματος, με αποτέλεσμα η ολική ικανότητα εκπομπής $\varepsilon_{(ολ)}$ να είναι διάφορη της μονάδας.

Για τα μήκη κύματος από 8 έως 14 μm , τα οποία, κυρίως, ανιχνεύουν οι δορυφορικοί αισθητήρες, η επιφάνεια της γης, εκτός των αστικών πλεγμάτων, καθώς και τα πυκνά νέφη, έχουν ικανότητα εκπομπής που προσεγγίζει την τιμή της μονάδας, με αποτέλεσμα τα σώματα να συμπεριφέρονται ως φαιά σώματα.

Υπάρχουν όμως ορισμένες εξαιρέσεις, όπως το χιόνι και η βλάστηση των οποίων οι ικανότητες εκπομπής και απορρόφησης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το μήκος κύματος και συνεπώς οι επιφάνειές τους δεν συμπεριφέρονται ως αληθινά φαιά σώματα. Το χιόνι απορροφά, σχετικά, ασθενώς στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο φάσμα και έντονα στις υπόλοιπες περιοχές της υπέρυθρης ακτινοβολίας.

Ο νόμος του Wien

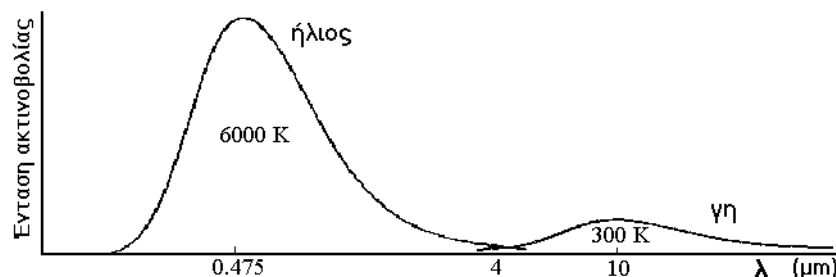
Νόμος του Wien δίνει τη σχέση του μήκους κύματος λ_{max} , όπου η ειδική ένταση ακτινοβολίας $I_{(\lambda)M}$ του μέλανος σώματος είναι μέγιστη, με την θερμοκρασία T του σώματος:

$$\lambda_{max} = \frac{C_1}{T} \quad (1.26)$$

όπου $C_1 = 2898 \mu\text{m K}$. Σύμφωνα με την προηγούμενη σχέση το λ_{max} μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με την θερμοκρασία T του σώματος.

Συνεπώς, σώματα με υψηλή θερμοκρασία εκπέμπουν ακτινοβολία με μικρά μήκη κύματος ενώ σώματα με χαμηλή θερμοκρασία εκπέμπουν μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία.

Αν γνωρίζουμε το μήκος κύματος λ_{max} , τότε η θερμοκρασία που βρίσκεται από την επίλυση της προηγούμενης σχέσης ως προς T , λέγεται *θερμοκρασία χρώματος (colour temperature)*.



Ο νόμος των Stefan – Boltzmann

Ο νόμος *των Stefan – Boltzmann* δίνει την ολική ροή ακτινοβολίας μέλανος σώματος F_M σε σχέση με την θερμοκρασία του T και εκφράζεται από την σχέση:

$$F_M = \sigma T^4$$

όπου $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ η σταθερά του Stefan - Boltzmann και T η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin της πηγής.

Η ολική ροή F της ακτινοβολίας ενός πραγματικού σώματος σε θερμοκρασία T και με ολική ικανότητα εκπομπής $\varepsilon_{ολ}$, δίνεται από τη σχέση:

$$F = \varepsilon_{ολ} F_M = \varepsilon_{ολ} \sigma T^4$$

Γνωρίζοντας την ολική ροή ακτινοβολίας F ή την ολική ροή ακτινοβολίας σε μια συγκεκριμένη περιοχή του φάσματος (π.χ στο θερμικό υπέρυθρο) και την αντίστοιχη ολική ικανότητα εκπομπής $\varepsilon_{ολ}$, τότε η θερμοκρασία T ονομάζεται ***θερμοκρασία ακτινοβολίας ή λαμπρότητας*** (*temperature radiation or brightness temperature*).

Η επίλυση της σχέσης ως προς T καθορίζει τη θερμοκρασία που θα είχε το σώμα αν ήταν μέλαν σώμα.

Η θερμοκρασία αυτή καλείται *ισοδύναμη θερμοκρασία ακτινοβολίας ή λαμπρότητας μέλανος σώματος* (*equivalent temperature radiation or brightness temperature*).

Το μέγιστο της ακτινοβολίας της επιφάνειας της γης και των πυκνών νεφών βρίσκεται ανάμεσα στα 10 και 12 μm , δηλαδή στο θερμικό υπέρυθρο. Σε αυτά τα μήκη κύματος η επιφάνεια της γης και τα πυκνά νέφη είναι δυνατόν να θεωρηθούν μέλανα σώματα ($\epsilon_{ολ} = 1$) και, κατά συνέπεια, σύμφωνα με τον νόμο των Stefan - Boltzmann η ακτινοβολία που εκπέμπουν μπορεί να μετατραπεί σε *θερμοκρασία ακτινοβολίας ή λαμπρότητας*, η οποία, στην περίπτωση αυτή, είναι ίση με την *ισοδύναμη θερμοκρασία ακτινοβολίας ή λαμπρότητας μέλανος σώματος*.

Η ακτινοβολία στο θερμικό υπέρυθρο καλείται και *θερμική ακτινοβολία (thermal radiance)*, η οποία εξαρτάται άμεσα τόσο από την θερμοκρασία της πηγής, σύμφωνα με τον νόμο των Stefan - Boltzmann όσο και από την επίδραση της ατμόσφαιρας κατά την διέλευσή της μέσα από αυτήν.

Ο νόμος του Beer-Lambert

Όταν μια ακτινοβολία προσπέσει σε ένα υλικό που δεν είναι τέλειο σώμα, τότε ένα μέρος της θα σκεδαστεί, ένα μέρος θα απορροφηθεί και το υπόλοιπο θα περάσει μέσα από το σώμα.

Σύμφωνα με το νόμο του Beer-Lambert, η μείωση της ειδικής έντασης της ακτινοβολίας $dI_{(\lambda)}$ λόγω απορρόφησης κατά τη διέλευσή της μέσα από ένα ρευστό είναι ανάλογη της έντασης $I_{(\lambda)}$ της εισερχόμενης ακτινοβολίας, της πυκνότητας ρ του ρευστού και του μήκους διαδρομής dx μέσα στο ρευστό και εκφράζεται από τη σχέση:

$$dI_{\lambda} = -I_{\lambda} k_{\lambda}^{ap} \rho dx$$

όπου $k_{\lambda}^{a\pi}$ ο συντελεστής εξασθένησης λόγω απορρόφησης του ρευστού ο οποίος εξαρτάται από τη φύση του υλικού και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.

Αν πέραν της απορρόφησης υπάρχει και σκέδαση δηλ. απομάκρυνση των φωτονίων από την αρχική δέσμη και μεταβολή της διεύθυνσης κίνησής τους, τότε ο νόμος του Beer-Lambert θα δίνεται από τη σχέση:

$$dI_{\lambda} = -I_{\lambda} k_{\lambda}^{\sigma\kappa} \rho dx$$

όπου $k_{\lambda}^{\sigma\kappa}$ ο συντελεστής εξασθένησης λόγω σκέδασης.

Αν σε ένα υλικό συμβαίνει και σκέδαση και απορρόφηση, τότε ο νόμος του Beer-Lambert εκφράζεται από τη σχέση:

$$dI_{\lambda} = -I_{\lambda} (k_{\lambda}^{a\pi} + k_{\lambda}^{\sigma\kappa}) \rho dx$$

Οι προηγούμενες σχέσεις παίρνουν τη μορφή:

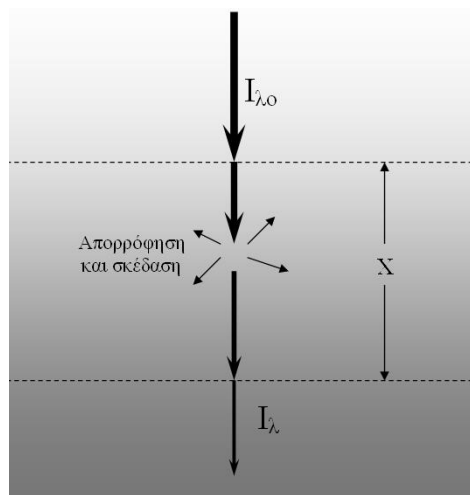
$$I_{\lambda} = I_{\lambda_0} e^{-k_{\lambda} \rho x}$$

όπου I_{λ_0} η αρχική ένταση ακτινοβολίας, I_{λ} η ένταση ακτινοβολίας μετά τη διέλευση απόστασης x μέσα στο υλικό, k_{λ} ο συντελεστής εξασθένησης λόγω σκέδασης ή απορρόφησης ή και των δυο και ρ η μέση πυκνότητα του στρώματος x .

Η προηγούμενη σχέση πολλές φορές εκφράζεται ως:

$$I_{\lambda} = I_{\lambda_0} e^{-u}$$

όπου u το οπτικό πάχος του ρευστού, το οποίο εξαρτάται από τη φύση του υλικού (k_{λ}), την περιεκτικότητα του σε σωματίδια (ρ) και το γεωμετρικό πάχος (x) του στρώματος.



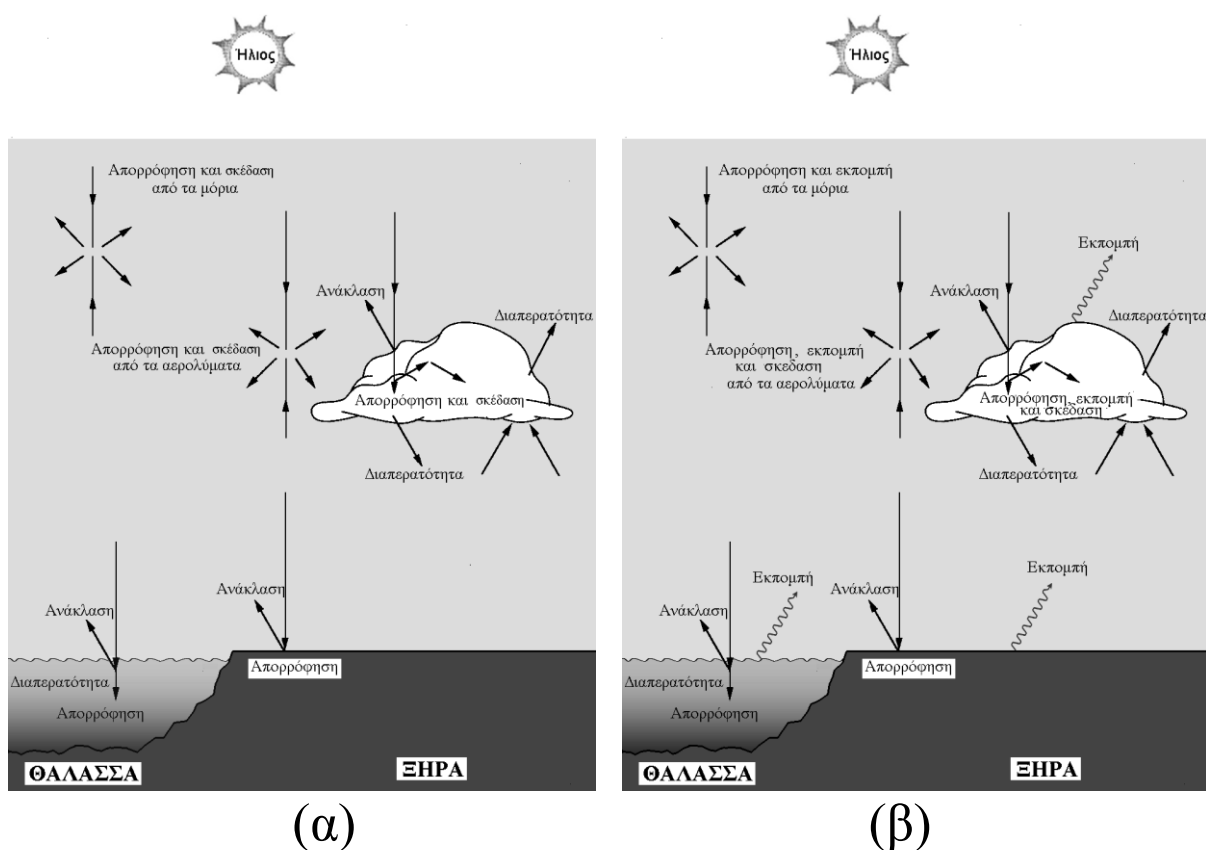
Η εξασθένηση ακτινοβολίας έντασης I_{λ_0} κατά τη διέλευσή της μέσα από ρευστό με μήκος διαδρομής x .

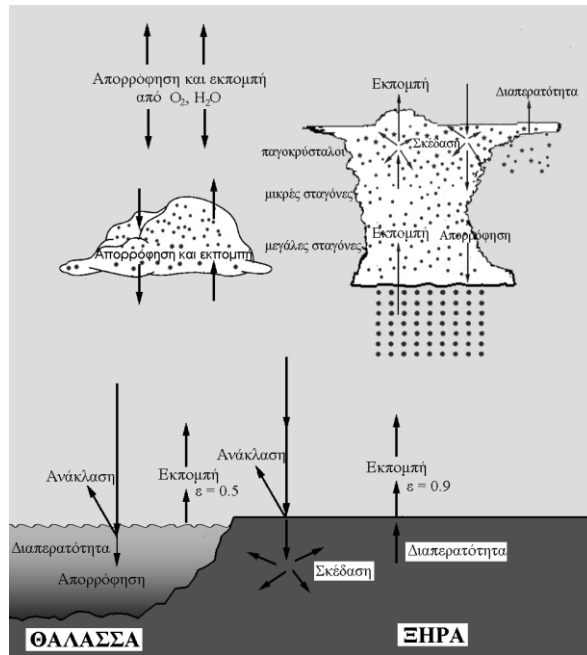
Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας με το γήινο σύστημα

Η ακτινοβολία που καταγράφουν οι δορυφορικοί αισθητήρες, έχει υποστεί αρκετές επιδράσεις κατά την διαδρομή της μέσα από το σύστημα γης - ατμόσφαιρας.

Γενικά, η επίδραση της ύλης στην ακτινοβολία εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Οι σημαντικότεροι αυτών, όπως η φυσική κατάσταση της ύλης (στερεά, υγρά ή αέρια) και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, καθορίζουν και το είδος της επίδρασης π.χ. σκέδαση, απορρόφηση και ανάκλαση.

Το είδος της επίδρασης εξαρτάται από την φασματική περιοχή της διαδιδόμενης ακτινοβολίας.





(γ)

Οι πιο σημαντικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ της ακτινοβολίας α) στο ορατό φάσμα β) στο υπέρυθρο φάσμα και (γ) στην περιοχή των μικροκυμάτων και της επιφάνειας της γης, της ατμόσφαιρας και των νεφών (τροποποιημένο σχήμα από Rao et al., 1990).

Αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με επιφάνειες στο έδαφος

Η γήινη επιφάνεια ανακλά και απορροφά την ηλιακή (μικρού μήκους κύματος) και ατμοσφαιρική (υπέρυθρη) ακτινοβολία που δέχεται και παράλληλα εκπέμπει η ίδια υπέρυθρη ακτινοβολία (γήινη ακτινοβολία) (**Error! Reference source not found.**). Οι αισθητήρες των δορυφόρων καταγράφουν την ακτινοβολία που προέρχεται από την υπό διερεύνηση επιφάνεια και αποτελεί το αποτέλεσμα όλων των προηγούμενων διεργασιών. Το ποσοστό της καταγραφόμενης ακτινοβολίας που αντιστοιχεί σε κάθε μια από τις

παραπάνω διεργασίες εξαρτάται από τη φύση της προσπίπτουσας επιφάνειας, το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και τη γωνία πρόσπτωσης.

Ανάκλαση

Η *ανάκλαση (reflection)* αξιοποιείται από τη δορυφορική τηλεπισκόπηση κυρίως για την καταγραφή του ορατού ή υπέρυθρου φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η ανάκλαση χρησιμοποιείται επίσης και για την καταγραφή της μικροκυματικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται προς την επιφάνεια της γης από δορυφορικές συσκευές τύπου ραντάρ.

Η ανάκλαση σε μια γήινη επιφάνεια εξαρτάται από την *τραχύτητα* της επιφάνειας σε σχέση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.

Εάν η επιφάνεια είναι ομαλή και λεία σε σχέση με το μήκος κύματος, τότε η ανάκλαση είναι *κατοπτρική (specular)*. Στην περίπτωση αυτή όλη ή μέρος της ακτινοβολίας επιστρέφει σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση με τη γωνία ανάκλασης να είναι ίση με την γωνία πρόσπτωσης.

Στην κατοπτρική ανάκλαση η ένταση της ακτινοβολίας που φτάνει στον παρατηρητή δηλ. στο δορυφόρο εξαρτάται μόνο από τη γωνία πρόσπτωσης, τη γωνία παρατήρησης, και την απόσταση του παρατηρητή από την επιφάνεια.

Στο ορατό φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας η κατοπτρική ανάκλαση εμφανίζεται σε λείες επιφάνειες όπως π.χ. σε ήρεμες υδάτινες επιφάνειες.

Ανάκλαση μπορεί να λάβει χώρα και μεταξύ επιφανειών που βρίσκονται υπό γωνία και τότε καλείται **διπλής αναπήδησης ανάκλαση ή γωνιακή ανάκλαση (*double-bounce reflection or corner reflection*)**.

Εάν η επιφάνεια είναι ανώμαλη σε σχέση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας τότε έχουμε *διάχυση (diffusion)* με την ακτινοβολία να διασκορπίζεται προς όλες τις διευθύνσεις. Υπάρχουν πολλές επιφάνειες που προκαλούν διάχυση της ορατής ακτινοβολίας όπως π.χ. επιφάνειες καλυμμένες με γρασίδι και τα νέφη.

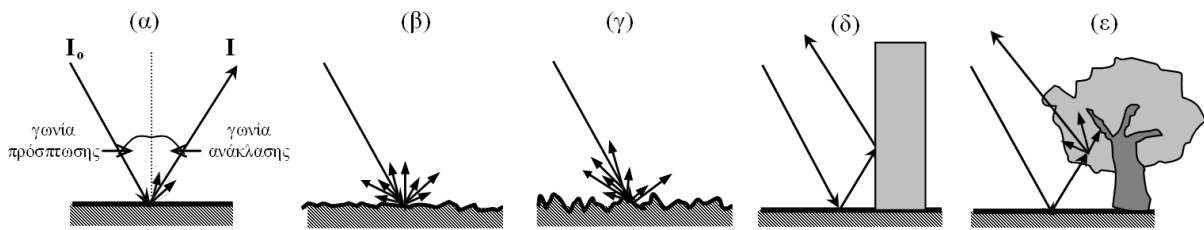
Μια επιφάνεια η οποία διαχέει την ακτινοβολία ισόποσα προς όλες τις κατευθύνσεις ονομάζεται **ισότροπη ή Λαμπερτιανή επιφάνεια**. Μια τέτοια επιφάνεια έχει την ίδια λαμπρότητα με οποιαδήποτε γωνία παρατήρησης.

Λόγω της απλότητας του μοντέλου αυτού, η έννοια της ισότροπης επιφάνειας χρησιμοποιείται συχνά ως μια προσέγγιση της οπτικής συμπεριφοράς των αντικειμένων που παρατηρούνται με τη βοήθεια της τηλεπισκόπησης.

Το Λαμπερτιανό όμως μοντέλο σε πολλές περιπτώσεις απέχει σημαντικά από την πραγματικότητα. Οι πραγματικές επιφάνειες ανακλούν με σύνθετο τρόπο την ακτινοβολία ο οποίος εξαρτάται από τη γεωμετρία της επιφάνειας π.χ. σχήμα, μέγεθος και προσανατολισμός της επιφάνειας (Campbell, 2002).

Μερικές επιφάνειες συμπεριφέρονται ως ισότροποι ανακλαστήρες σε συγκεκριμένες γωνίες πρόσπτωσης αλλά παρουσιάζουν ιδιότητες μη ισότροπης επιφάνειας σε άλλες γωνίες.

Υπάρχει μια συνάρτηση για κάθε επιφάνεια η οποία περιγράφει τις οπτικές της ιδιότητες σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας και τη γωνία παρατήρησης και για αυτό το λόγο λέγονται *δυ-διευθυνσιακές συναρτήσεις κατανομής της ανάκλασης (bidirectional reflectance distribution function, BRDF)*.



Ανάκλαση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε διάφορες επιφάνειες (α) κατοπτρική ανάκλαση, (β) διάχυση σε επιφάνεια μικρής τραχύτητας, (γ) διάχυση σε επιφάνεια μεγάλης τραχύτητας, (δ) και (ε) γωνιακή ανάκλαση.

Εκπομπή

Η επιφάνεια της γης απορροφά τη μικρού μήκους ηλιακή ακτινοβολία (ορατό, εγγύς και μέσο υπέρυθρο) και την επανεκπέμπει σε μεγαλύτερο όμως μήκος κύματος, στην φασματική περιοχή της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από μια γήινη επιφάνεια καλύπτει τη φασματική περιοχή του υπέρυθρου που εκτείνεται από $3 \mu\text{m} - 3000 \mu\text{m}$ και καλείται **θερμική υπέρυθρη ή μακρινή υπέρυθρη ή εκπεμπόμενη υπέρυθρη (thermal or far or emitted infrared radiance)**. Εκπεμπόμενη ακτινοβολία, με μικρότερη όμως ένταση, υπάρχει και σε μεγαλύτερα μήκη κύματος δηλ. στην περιοχή των μικροκυμάτων ($\lambda > 3000 \mu\text{m}$).

Οι διαφορές στην εκπεμπόμενη θερμική υπέρυθη ακτινοβολία των σωμάτων εκφράζουν τις αντίστοιχες διαφορές στην ικανότητα των σωμάτων και των επιφανειών να απορροφούν μικρού μήκους κύματος ηλιακή ακτινοβολία ($0.3 - 3\mu\text{m}$) και ακολούθως να την επανεκπέμπουν με τη μορφή μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας στην περιοχή του θερμικού υπέρυθρου.

Έτσι, με εξαίρεση τη γεωθερμική ενέργεια, πυρκαγιές και ανθρωπογενείς πηγές θερμότητας (π.χ. εργοστάσια), η κύρια πηγή της εκπεμπόμενης θερμικής υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι η μικρού μήκους κύματος ηλιακή ακτινοβολία.

Η ένταση της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας εξαρτάται άμεσα από τη *θερμοκρασία* και το *συντελεστή εκπομπής* του σώματος. Καταγράφοντας την εκπεμπόμενη θερμική υπέρυθη ακτινοβολία είναι δυνατόν να υπολογιστεί η θερμοκρασία λαμπρότητας του σώματος σύμφωνα με τον νόμο των Stefan – Boltzmann, με την προϋπόθεση ότι είναι γνωστός ο συντελεστής εκπομπής του υλικού.

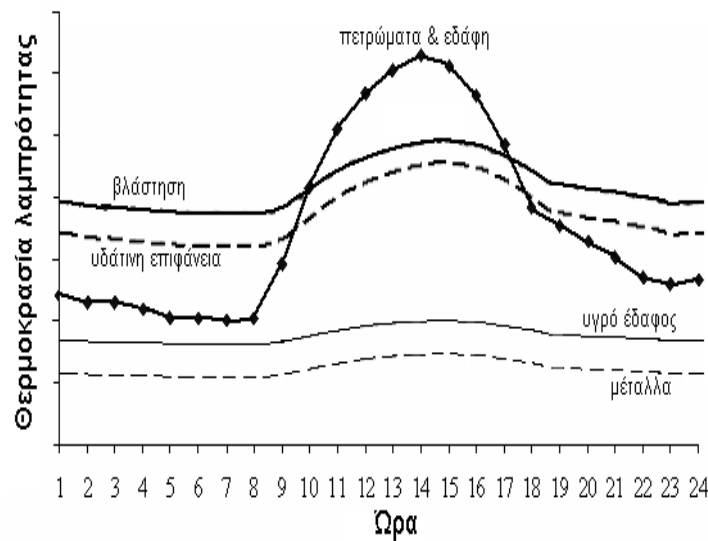
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η θερμική υπέρυθη ακτινοβολία κατά τη διέλευσή της μέσα από την ατμόσφαιρα θα υποστεί σημαντική απορρόφηση από αέριες χημικές ενώσεις.

Η απορρόφηση περιορίζεται στις περιοχές του θερμικού υπερύθρου που καλούνται **ατμοσφαιρικά παράθυρα** όπως αυτές που εκτείνονται από 3 έως 5 μm και από 10 έως 12 μm . Η περιοχή αυτή χρησιμοποιείται ιδιαίτερα από τους δορυφορικούς αισθητήρες και για ένα άλλο λόγο.

Το έδαφος της γης και η θάλασσα γενικά δεν εκπέμπουν ως μέλανα σώματα. Ειδικότερα όμως στην περιοχή του θερμικού υπερύθρου που εκτείνεται από 10 έως 12 μm , η επιφάνεια της γης, εκτός των αστικών πλεγμάτων, καθώς και τα πυκνά νέφη, έχουν ικανότητα εκπομπής που προσεγγίζει την τιμή της μονάδας, με αποτέλεσμα, ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής για ακρίβεια, να θεωρούνται μέλανα σώματα.

Η θερμοκρασία των σωμάτων στην επιφάνεια της γης εξαρτάται από:

- το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που είναι διαθέσιμο για τη θέρμανση του σώματος το οποίο είναι συνάρτηση του ύψους του ήλιου, των ατμοσφαιρικών συνθηκών (νέφη, υγρασία), της τοπογραφίας και του προσανατολισμού της επιφάνειας σε σχέση με τις ακτίνες του ήλιου.
- τις θερμικές ιδιότητες του σώματος οι οποίες είναι συνάρτηση της σύστασής του.



Καμπύλες της ενδοημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας λαμπρότητας για διάφορες επιφάνειες (τροποποιημένο σχήμα από Sabins, 1996).

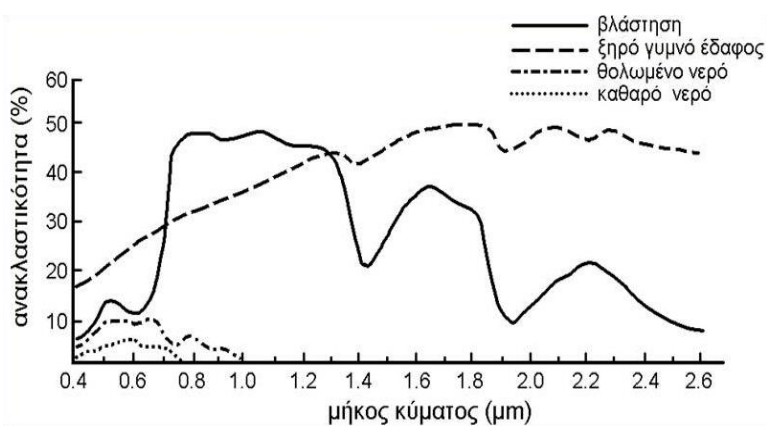
Φασματικές ιδιότητες των επιφανειών

Με τον όρο *φασματική απόκριση* εννοούμε την κατανομή της ανακλώμενης ή εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από μια επιφάνεια σε σχέση με το μήκος κύματος λ .

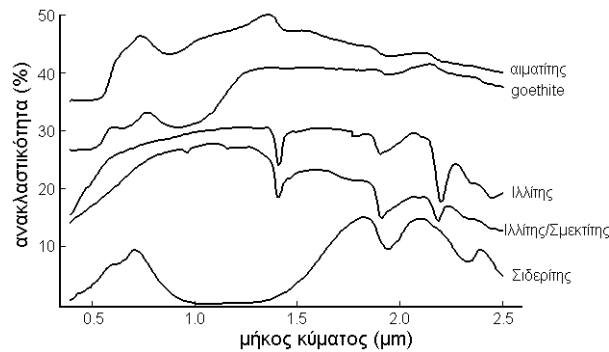
Κάθε υλικό παρουσιάζει διαφορετική φασματική απόκριση, η μελέτη της οποίας μας επιτρέπει τη διάκριση μιας επιφάνειας από κάποια άλλη και την εξαγωγή πληροφορίας σχετικά με το σχήμα, το μέγεθος, τις φυσικές ακόμη και χημικές ιδιότητες της.

Η μορφή της καμπύλης της φασματικής απόκρισης μιας επιφάνειας σε σχέση με το μήκος κύματος λ καλείται **φασματική υπογραφή** (*spectral signature*) της επιφάνειας και είναι μοναδική για κάθε επιφάνεια. Η φασματική υπογραφή της κάθε επιφάνειας αποτελεί τη βάση για την αναγνώριση και τον μεταξύ τους διαχωρισμό.

Για παράδειγμα είναι χαρακτηριστική η φασματική υπογραφή της υδάτινης επιφάνειας η οποία ανακλά ελάχιστα και μόνο στο ορατό φάσμα (0.4 – 0.7 μm) με μέγιστο στο πράσινο.



Φασματικές υπογραφές τριών βασικών επιφανειών (έδαφος, βλάστηση, υδάτινη επιφάνεια).



Φασματικές υπογραφές πέντε μεταλλευμάτων (Πηγή: Spectral International Inc.).

Αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με υδάτινες επιφάνειες

Και οι υδάτινες επιφάνειες ανακλούν και απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία που δέχονται και εκπέμπουν θερμική υπέρυθη ακτινοβολία, αλλά με διαφορετικό τρόπο από τις γήινες επιφάνειες.

Οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος που φτάνει στον δορυφορικό αισθητήρα είναι η ανάκλαση από την υδάτινη επιφάνεια, η απορρόφηση από τα μόρια του νερού και το φυτοπλαγκτόν, η σκέδαση από τα μόρια του νερού και τα αιωρούμενα σωματίδια, η ατμοσφαιρική σκέδαση και σε ορισμένες περιπτώσεις η σκέδαση από το βυθό.

Ανάκλαση

Το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται από την επιφάνεια του νερού είναι μικρό ($< 9\%$) και εξαρτάται από τη γωνία παρατήρησης, μεταφέρει δε μικρό ποσό πληροφορίας για το ίδιο το νερό.

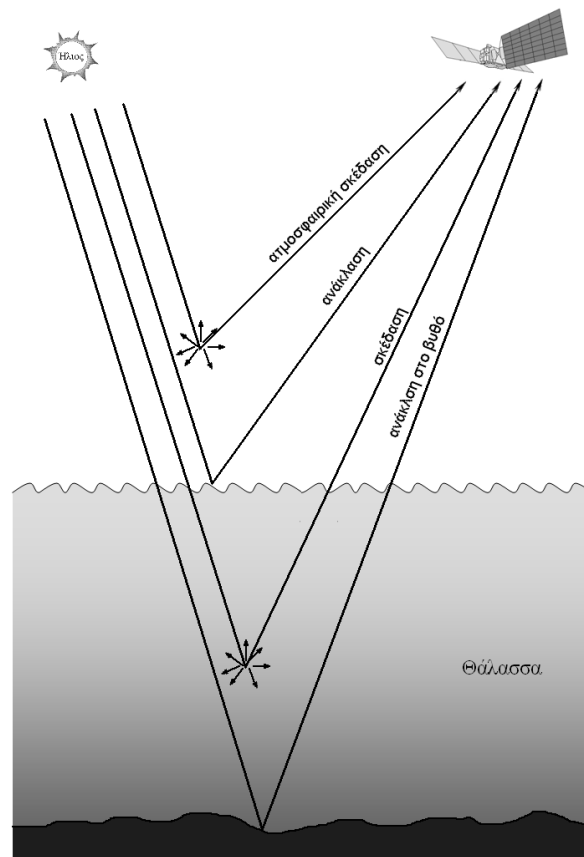
Είναι όμως χρήσιμο για την άντληση πληροφορίας σχετικά με την κατάσταση της επιφάνειας του νερού και κατ' επέκταση για τον άνεμο και τα κύματα. Η κυματώδης υδάτινη επιφάνεια ανακλά μεγαλύτερο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας προς τον αισθητήρα σε σχέση με την ήρεμη και ομαλή επιφάνεια, ιδιαίτερα στο ορατό φάσμα.

Απορρόφηση

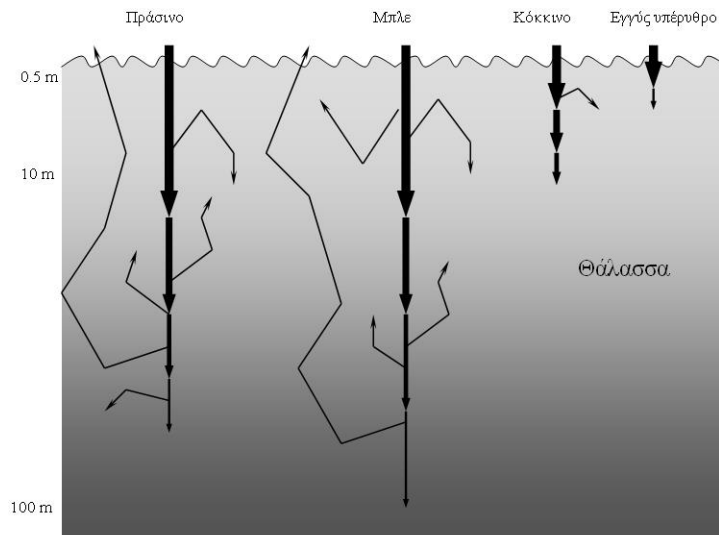
Η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από την υδάτινη μάζα με δυο τρόπους: από τα μόρια του νερού, αυξάνοντας έτσι τη θερμοκρασία του, και από το φυτοπλανκτόν κατά τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης.

Η απορρόφηση του ορατού φωτός εξαρτάται από το μήκος κύματος. Συγκεκριμένα, το μπλε και το πράσινο απορροφούνται ελάχιστα στα καθαρά νερά ενώ από το πορτοκαλί προς το κόκκινο και το υπέρυθρο η απορρόφηση είναι σημαντική.

Αυτό σημαίνει ότι το μπλε έχει τη μεγαλύτερη διεισδυτικότητα ενώ το κόκκινο και περισσότερο το υπέρυθρο απορροφώνται στα πρώτα μέτρα διάδοσής τους μέσα στο νερό.



Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τα φασματικά χαρακτηριστικά μιας υδάτινης μάζας.



Απορρόφηση και σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορα βάθη μέσα στη θάλασσα.

Σκέδαση

Παράλληλα, η ηλιακή ακτινοβολία σκεδάζεται πρωτίστως από τα μόρια του νερού και δευτερευόντως από διάφορα αιωρούμενα σωματίδια (κυρίως αιωρούμενα ιζήματα).

Η σκέδαση αυτή καλείται και ως *ανάκλαση της υδάτινης μάζας (volume reflection)*.

Όπως αναφέρθηκε, η ανάκλαση του ηλιακού φωτός από μια υδάτινη επιφάνεια είναι πολύ μικρή και εξαρτάται από τη γωνία παρατήρησης. Έτσι σε μια δορυφορική εικόνα που καταγράφει την ορατή ακτινοβολία, η θάλασσα διακρίνεται πιο σκοτεινή από τη ξηρά. Ουσιαστικά η ακτινοβολία που καταγράφει ο αισθητήρας είναι κυρίως η σκεδαζόμενη από την υδάτινη επιφάνεια στα διάφορα μήκη κύματος. Η

ακτινοβολία αυτή μεταφέρει πληροφορία για τα φασματικά χαρακτηριστικά του νερού (π.χ. χρώμα).

Κάθε μήκος κύματος όμως προέρχεται από διαφορετικό στρώμα της θάλασσας καθώς η διείσδυση του φωτός μέσα στο νερό εξαρτάται από το μήκος κύματος.

Έτσι, σε καθαρά νερά, στη φασματική ζώνη του μπλε και πράσινου η πληροφορία που καταγράφει ο δορυφορικός αισθητήρας προέρχεται από τα πρώτα 10-15 m.

Στο κόκκινο προέρχεται από τα 2 - 5 m και στο εγγύς υπέρυθρο μόλις από 0.5 m.

Συχνά λοιπόν για εφαρμογές βαθυμετρίας παράκτιων υδάτων χρησιμοποιείται η μπλε-πράσινη ακτινοβολία η οποία προέρχεται από την ανάκλαση της στον πυθμένα του βυθού.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η πληροφορία αυτή μεταβάλλεται ανάλογα με τη θολερότητα των νερών δηλ. την περιεκτικότητα του νερού σε διάφορα αιωρούμενα σωματίδια, γεγονός που επιτρέπει την καταγραφή της ποιότητας των νερών, την κατανομή του φυτοπλαγκτόν κ.α. Όσο αυξάνεται η θολερότητα του νερού αυξάνεται και η σκέδαση του ορατού φωτός και έτσι η υδάτινη μάζα παύει να συμπεριφέρεται ως ένα “μαύρο” αντικείμενο. Παράλληλα, το μέγιστο της σκέδασης μετακινείται από την περιοχή του μπλε στην περιοχή του πράσινου.

Αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα

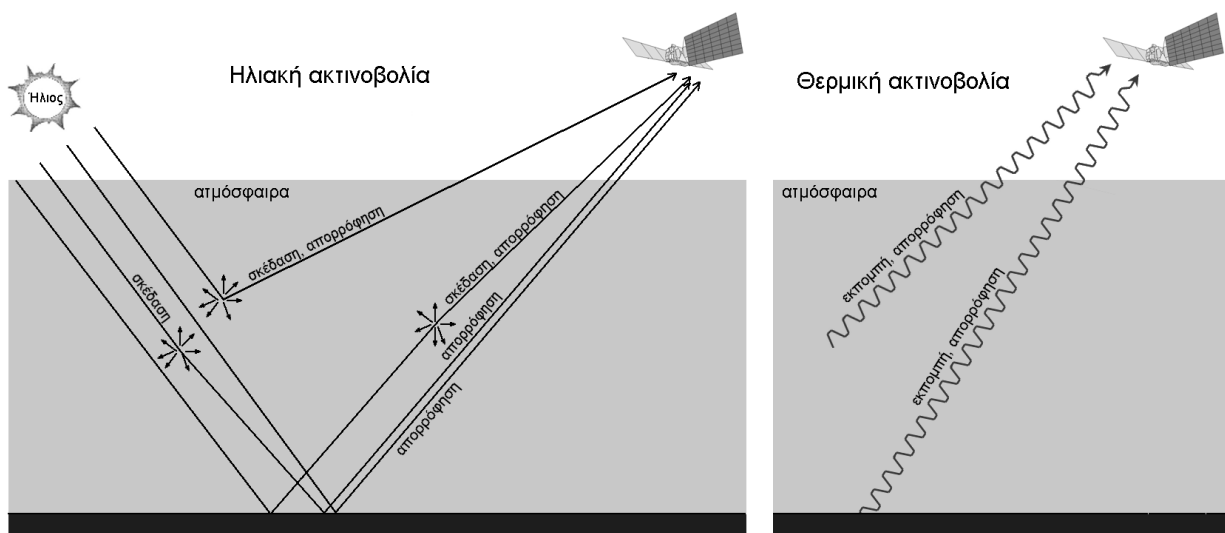
Η ακτινοβολία που εκπέμπεται ή ανακλάται από μια επιφάνεια στη γη, για να καταγραφεί από το δορυφορικό αισθητήρα θα πρέπει πρώτα να διαπεράσει την ατμόσφαιρα της γης, η οποία επιδρά με διάφορους τρόπους σε αυτή.

Τα σώματα που βρίσκονται σε υγρή ή στερεά κατάσταση στην ατμόσφαιρα (υδροσταγόνες και παγοκρύσταλλοι) σκεδάζουν, απορροφούν και εκπέμπουν σε μία ευρεία περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Η επίδραση της ατμόσφαιρας στην *ηλιακή ακτινοβολία* που ανακλάται σε μια επιφάνεια της γης έχει ως αποτέλεσμα μέρος της ακτινοβολίας να σκεδαστεί, να απορροφηθεί ένα άλλο και το υπόλοιπο να φτάσει στο δορυφορικό αισθητήρα.

Η ακτινοβολία θα φτάσει στον δορυφορικό αισθητήρα είτε κατ' ευθείαν από την ατμόσφαιρα είτε ανακλώμενη στην επιφάνεια του εδάφους και σε νέφη και καλείται *ακτινοβολία διαδρομής (path radiance)*. Η ακτινοβολία που φτάνει στο δορυφορικό αισθητήρα, αποτελεί το άθροισμα όλων αυτών των ακτινοβολιών.

Η θερμική υπέρυθρη ακτινοβολία επηρεάζεται με διαφορετικό τρόπο από την ατμόσφαιρα καθώς η σκέδαση από τα συστατικά της ατμόσφαιρας είναι μικρή ενώ αντίθετα η απορρόφηση από αυτά είναι σημαντική σε σχέση με την απορρόφηση της μικρού μήκους κύματος ηλιακής ακτινοβολίας.



Η επίδραση της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμική υπέρυθρη ακτινοβολία που φτάνει στον δορυφορικό αισθητήρα.

Επίδραση των νεφών

Τα νέφη στην ατμόσφαιρα επηρεάζουν ισχυρά την ακτινοβολία που διαδίδεται στην ατμόσφαιρα ή εκπέμπεται από τα ίδια τα νέφη. Η επίδραση των νεφών, στην ορατή και υπέρυθρη ακτινοβολία, εξαρτάται άμεσα από το πάχος τους. Πρέπει να σημειωθεί ότι, για την πλήρη περιγραφή της επίδρασης ενός νεφικού στρώματος στην διερχόμενη ακτινοβολία, πρέπει να ληφθεί υπόψη πέραν του μεγέθους των υδροσταγόνων και το οπτικό πάχος του νέφους. **Η έννοια του οπτικού πάχους συνδυάζει το γεωμετρικό πάχος με το περιεχόμενο σε νερό του νέφους.**

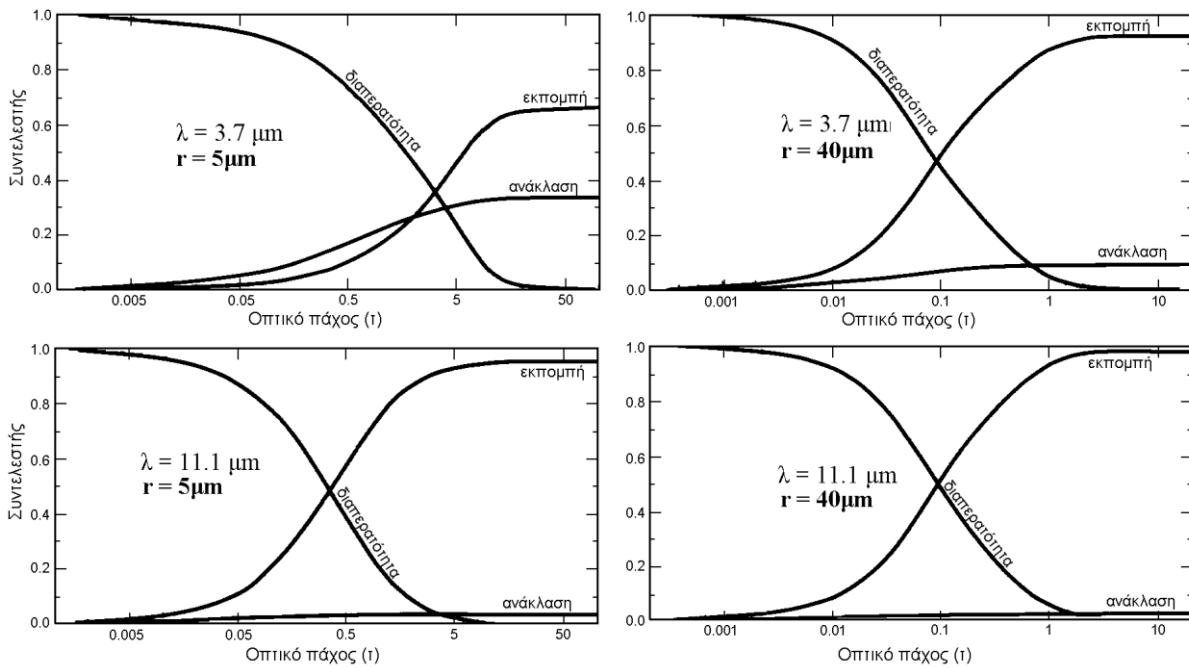
Στην περιοχή του ορατού φάσματος, η ακτινοβολία η οποία διαδίδεται μέσα από τα νέφη και ανακλάται από αυτά, προέρχεται κυρίως από την πολλαπλή σκέδαση της ακτινοβολίας κατά την διαδρομή της μέσα από το νέφος η οποία εξαρτάται από το μέγεθος R των υδροσταγόνων και το οπτικό πάχος τ του νέφους. Για μία σφαιρική υδροσταγόνα, η κατανομή της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας υπολογίζεται με την θεωρία του Mie.

Στην περιοχή του θερμικού υπέρυθρου η μέγιστη ικανότητα εκπομπής εξαρτάται αποκλειστικά από το οπτικό πάχος του νέφους καθώς το μέγεθος των υδροσταγόνων δεν επηρεάζει σημαντικά την εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία.

Συγκεκριμένα, η ικανότητα εκπομπής του νέφους αυξάνεται με την αύξηση του οπτικού πάχους και τείνει προς την μονάδα για τα πολύ πυκνά νέφη (Rao et al., 1990).

Κατά συνέπεια τα πυκνά νέφη εκπέμπουν στο θερμικό υπέρυθρο ως μέλανα σώματα στην θερμοκρασία των υδροσταγόνων ή των παγοκρυστάλλων που βρίσκονται στις κορυφές τους.

Το μεγάλο εύρος των θερμοκρασιών, που παρουσιάζουν οι κορυφές των νεφών, έχει ως αποτέλεσμα η εκπεμπόμενη υπέρυθρη ακτινοβολία στο ατμοσφαιρικό παράθυρο (10.5 - 12 μ m) να εξαρτάται άμεσα από το ύψος της κορυφής τους.



Συντελεστής διαπερατότητας, ανακλαστικότητας και ικανότητα εκπομπής σε σχέση με το οπτικό πάχος (τ) για δυο διαφορετικά μεγέθη σφαιρικών υδροσταγόνων (r) και μήκη κύματος $\lambda = 3.75 \mu\text{m}$ (επάνω) και $\lambda = 11.14 \mu\text{m}$ (κάτω) (τροποποιημένο σχήμα από Rao et al., 1990).

Συνοπτική περιγραφή της επίδρασης των νεφών στην ορατή και υπέρυθρη ακτινοβολία.

Ορατό	Υπέρυθρο
Ανακλάται και διαδίδεται μέσα από το νέφος μέσω πολλαπλών σκεδάσεων οι οποίες εξαρτώνται από το μέγεθος των υδροσταγόνων και το οπτικό πάχος τ του νέφους. Η σκέδαση και η απορρόφηση της ορατής ακτινοβολίας εξαρτώνται ελάχιστα από το μήκος κύματος.	Τα πυκνά νέφη εκπέμπουν ως μέλανα σώματα στην θερμοκρασία των κορυφών τους. Η εκπεμπόμενη υπέρυθρη ακτινοβολία στο ατμοσφαιρικό παράθυρο (10.5 - 12 μ m) εξαρτάται άμεσα από το ύψος των κορυφών τους. Η ανακλαστικότητα της θερμικής ακτινοβολίας είναι ασήμαντη.

Αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με τις αέριες χημικές ενώσεις της ατμόσφαιρας

Η ακτινοβολία που εκπέμπεται ή ανακλάται από μια επιφάνεια της γης διέρχεται από την ατμόσφαιρα πριν φτάσει στο δορυφορικό αισθητήρα. Αν η ακτινοβολία είναι στο ορατό φάσμα, τότε ένα ποσό αυτής απορροφάται και ένα άλλο σκεδάζεται από άτομα, μόρια, ιόντα της ατμόσφαιρας. Αν είναι υπέρυθρη ακτινοβολία τότε ένα ποσό αυτής απορροφάται από τα μόρια της ατμόσφαιρας και ένα άλλο ποσό προστίθεται σε αυτή λόγω εκπομπής.

Απορρόφηση. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία απορροφάται κυρίως από το CO_2 , το H_2O και το O_3 , ανάλογα με το μήκος κύματος λ . Τα μόρια των αέριων χημικών ενώσεων αλληλεπιδρούν με την ακτινοβολία σε συγκεκριμένα μήκη κύματος ή περιοχές του φάσματος, σε αντίθεση με τα μόρια των στερεών και των υγρών που αλληλεπιδρούν με το σύνολο σχεδόν του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Λόγω της απορροφούμενης ή εκπεμπόμενης ενέργειας, τα μόρια των αέριων χημικών ενώσεων μεταπίπτουν σε διακριτές επιτρεπόμενες ενεργειακές καταστάσεις, οι οποίες καθορίζονται από την δομή του μορίου.

Η θερμοκρασία ενός αερίου καθορίζεται από την μέση ταχύτητα των μορίων. Η αλληλεπίδραση των μορίων και της ακτινοβολίας έχει σαν αποτέλεσμα την μεταφορά ενέργειας από το πεδίο ακτινοβολίας στα μόρια, η οποία αλλάζει τόσο την ενεργειακή κατάσταση των μορίων όσο και την ίδια την ακτινοβολία.

Όταν απορροφάται ακτινοβολία, τότε το άτομο διεγείρεται με την απορρόφηση ενός ή περισσότερων φωτονίων. Το μόριο τότε μετατρέπει την ενέργεια σε θερμότητα, η οποία μεταφέρεται μέσω των συγκρούσεων διαδοχικά στα υπόλοιπα μόρια.

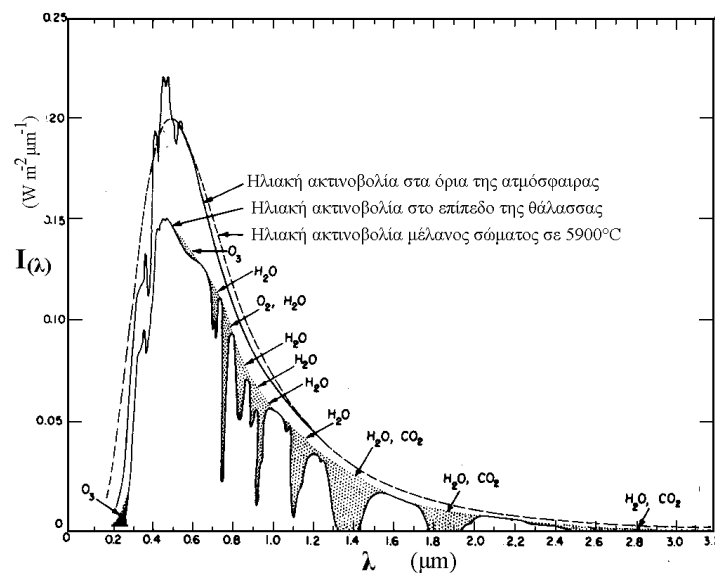
Ακολούθως, τα μόρια που θερμάνθηκαν απελευθερώνουν ενέργεια εκπέμποντας φωτόνια. Στην περίπτωση που απορροφάται ένα υψηλής ενέργειας φωτόνιο, τότε εκπέμπονται αρκετά φωτόνια χαμηλότερης ενέργειας σε μεγαλύτερα μήκη κύματος.

Αντιθέτως, στη σκέδαση ‘εκπέμπεται’ ακτινοβολία στο ίδιο μήκος κύματος με αυτό της ακτινοβολίας την οποία δέχτηκε αρχικά το μόριο.

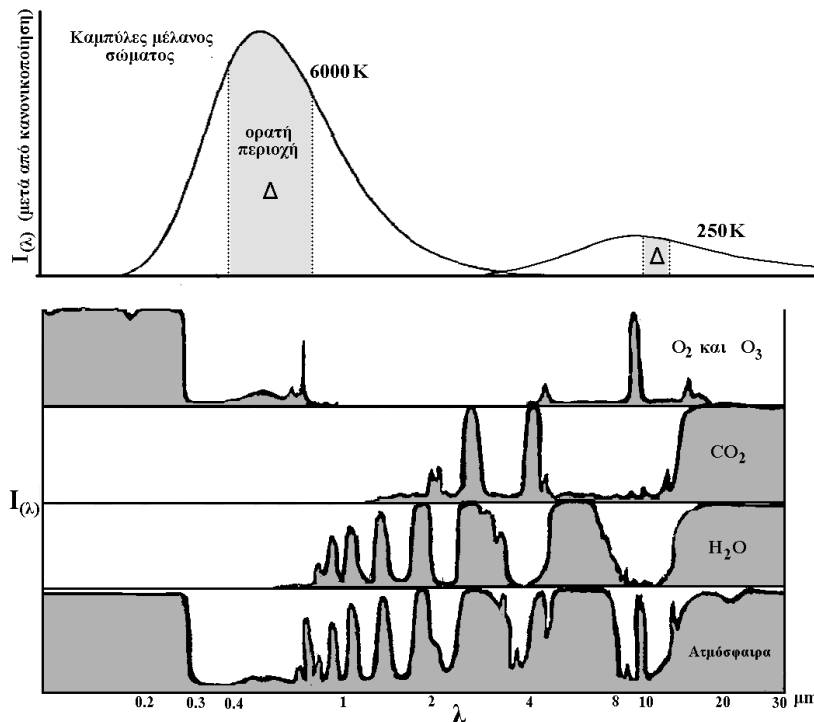
Τα μήκη κύματος, στα οποία συμβαίνει απορρόφηση ενέργειας, αντιστοιχούν σε **γραμμές απορρόφησης** (*absorption bands*).

Η απορρόφηση εξαρτάται από το μήκος κύματος λ :

- Η ορατή ακτινοβολία ($0.38 < \lambda < 0.72 \mu\text{m}$) απορροφάται ασθενώς κυρίως από το όζον (O_3) και το οξυγόνο (O_2).
- Η υπέρυθρη ακτινοβολία ($\lambda > 0.72$) απορροφάται κυρίως από τους υδρατμούς (H_2O) και δευτερευόντως από το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) ενώ το όζον (O_3) απορροφά ελάχιστη από αυτή (γύρω στα $10 \mu\text{m}$). Η ατμοσφαιρική υγρασία (H_2O) συγκρατεί ένα μεγάλο ποσοστό (έως και 80%) της ακτινοβολίας με μήκη κύματος από 5.5 έως $7 \mu\text{m}$ αλλά και πέραν των $13 \mu\text{m}$. Το CO_2 απορροφά μήκη κύματος μεγαλύτερα των $2 \mu\text{m}$ δηλ στο μέσο και θερμικό υπέρυθρο.



Η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στο όριο της ατμόσφαιρας, στην επιφάνεια της θάλασσας, καθώς και για μέλαν σώμα θερμοκρασίας 5900°C .



Οι καμπύλες του Planck για τη γη και τον ήλιο σε σχέση με τα φάσματα απορρόφησης του O_3 , του CO_2 , του H_2O και συνολικά της ατμόσφαιρας. Η σκιασμένη φασματική περιοχή Δ χρησιμοποιείται κυρίως από την δορυφορική τηλεπισκόπηση.

Όταν η υπέρυθη ακτινοβολία ενός σώματος διέρχεται από ένα στρώμα της ατμόσφαιρας, τότε ένα ποσό απορροφάται από τα μόρια του στρώματος και παράλληλα, ένα άλλο ποσό προστίθεται σε αυτή λόγω εκπομπής. Η συνολική αλλαγή, που θα υποστεί η ακτινοβολία, καθορίζεται από την θερμοκρασία, τη συγκέντρωση και το είδος των αερίων που περιέχονται στο στρώμα και την απορροφούν ή τη σκεδιάζουν.

Η ακτινοβολία, που καταγράφει ο δορυφόρος, στο μήκος κύματος που βρίσκεται στο κέντρο των μεγάλων γραμμών απορρόφησης, προέρχεται κυρίως από την κορυφή της ατμόσφαιρας. Αντιθέτως, η αντίστοιχη ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας (κυρίως από τα νέφη) και την επιφάνεια της γης, συνήθως απορροφάται πλήρως.

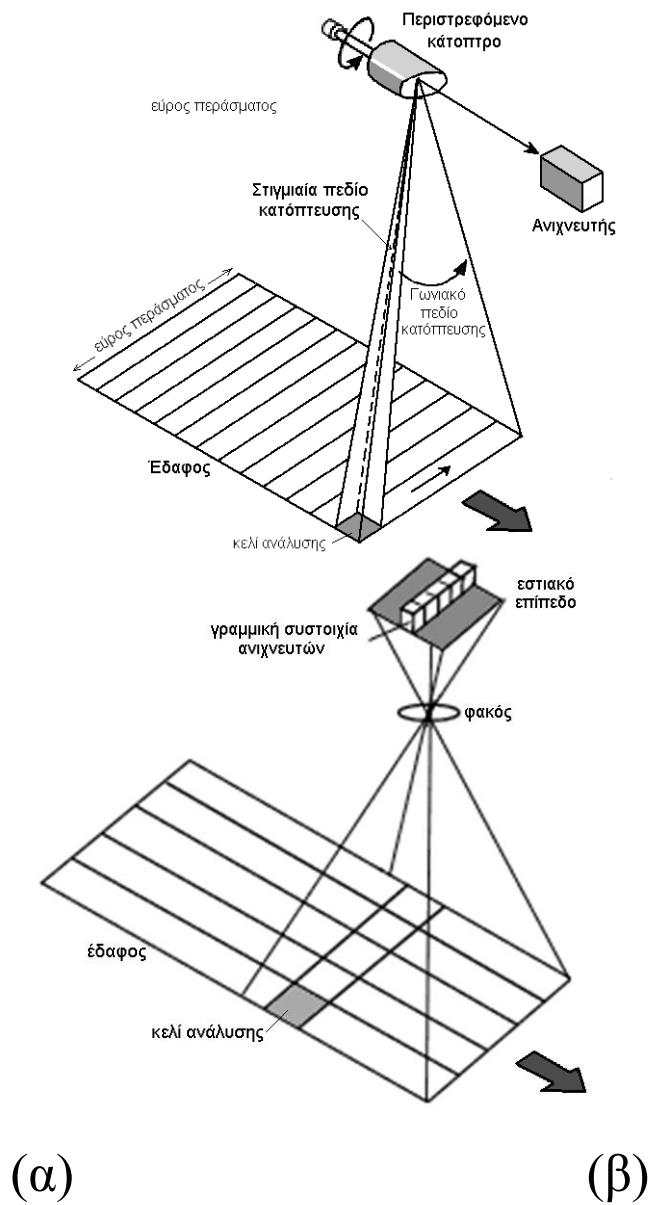
Τα αέρια της ατμόσφαιρας απορροφούν σε όλο το εύρος του φάσματος. Υπάρχουν όμως μερικές περιοχές του φάσματος μεταξύ των γραμμών απορρόφησης, κυρίως στο υπέρυθρο, όπου η ατμόσφαιρα είναι σχεδόν διάφανη. **Οι περιοχές του φάσματος που παρουσιάζουν μικρή ατμοσφαιρική απορρόφηση καλούνται ατμοσφαιρικά παράθυρα.**

Η δορυφορική τηλεπισκόπηση αξιοποιεί, κυρίως, τα ατμοσφαιρικά παράθυρα στο φάσμα του θερμικού υπέρυθρου για να ελαχιστοποιήσει την επίδραση της ατμόσφαιρας στην μετρούμενη ακτινοβολία.

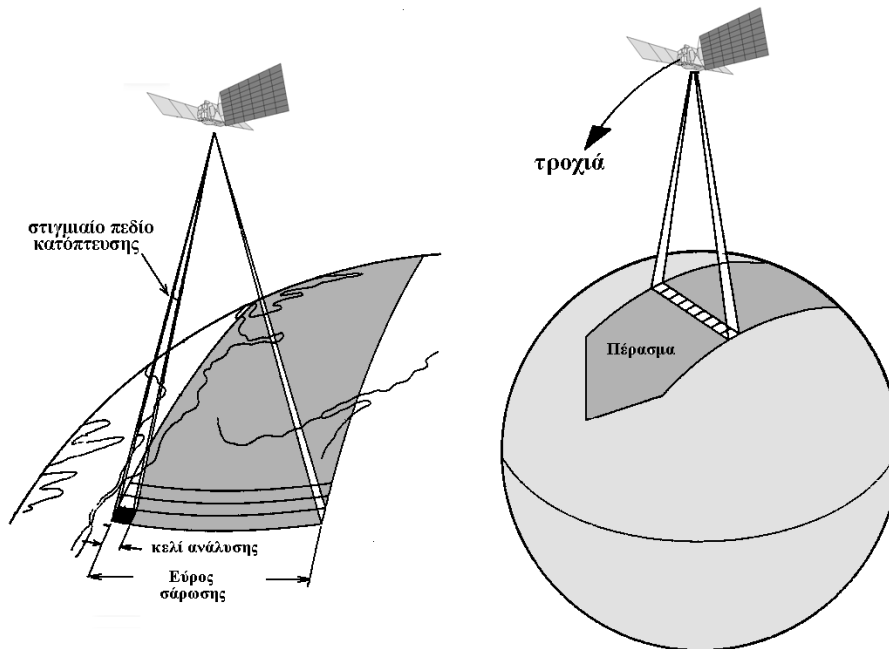
Στο φάσμα του υπέρυθρου τα πιο σημαντικά ατμοσφαιρικά παράθυρα είναι από 3.5 μm έως 4.1 μm και από 10.5 έως 12.5 μm . Το δεύτερο ατμοσφαιρικό παράθυρο (10.5 - 12.5 μm) είναι το πιο σημαντικό επειδή ταυτίζεται με την περιοχή μέγιστης γήινης ακτινοβολίας.

Στην περίπτωση που τα ατμοσφαιρικά παράθυρα δεν είναι πλήρως απαλλαγμένα από την ατμοσφαιρική απορρόφηση, τα αέρια της ατμόσφαιρας απορροφούν και εκπέμπουν ακτινοβολία, η οποία αλλάζει τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας που μετράται από τον δορυφορικό αισθητήρα. Το φαινόμενο αυτό, συχνά απαιτεί την εφαρμογή της διαδικασίας ατμοσφαιρικής διόρθωσης των δορυφορικών καταγραφών.

Σκέδαση. Η υπέρυθη ακτινοβολία δεν σκεδάζεται από τα αέρια της ατμόσφαιρας. Η ορατή ακτινοβολία σκεδάζεται από τα άτομα, μόρια και ιόντα της ατμόσφαιρας σύμφωνα με τη σκέδαση Rayleigh. Η σκέδαση Rayleigh απαντάται όταν τα σωματίδια στην ατμόσφαιρα έχουν ακτίνα R πολύ μικρότερη του μήκους κύματος λ της ακτινοβολίας ($2\pi R/\lambda < 0.1$). Τέτοια σωματίδια μπορεί να είναι μικρά κομμάτια σκόνης, μόρια ατμοσφαιρικών αερίων, όπως άζωτο (N_2) και οξυγόνο (O_2), και άτομα ή ιόντα ατμοσφαιρικών αερίων, όπως ατομικό οξυγόνο (O).



(α) Σαρωτής με εγκάρσια στην τροχιά διεύθυνση. (β) Σαρωτής κατά μήκος της τροχιάς.



Περάσματα και τρόποι σάρωσης δορυφόρων πολικής τροχιάς. Αριστερά: εγκάρσια στη τροχιά σάρωση. Δεξιά: σάρωση κατά μήκος της τροχιάς (Τροποποιημένο σχήμα από Rao, 1990).

Η κυκλική κίνηση που εκτελεί το κάτοπτρο για τη σάρωση μιας γραμμής, μετρημένη σε μοίρες, καλείται *γωνιακό πεδίο κατόπτευσης (angular field of view)* και καθορίζει το εύρος του περάσματος (*swath*) του δορυφόρου.

Το γωνιακό πεδίο κατόπτευσης των σαρωτών που φέρονται από δορυφόρους είναι σχετικά μικρό (10-20°) λόγω του μεγάλου ύψους στο οποίο βρίσκονται.

Επειδή η απόσταση του αισθητήρα από την επιφάνεια της γης αυξάνει προς τις άκρες της γραμμής σάρωσης, το κελί ανάλυσης μεγαλώνει εισάγοντας έτσι γεωμετρικές παραμορφώσεις στην εικόνα.

β. Οπτικο-ηλεκτρονικοί σαρωτές (*optical-electronic*), οι οποίοι κατευθύνουν άμεσα την ακτινοβολία που προέρχεται από τη σκηνή μέσω του φακού σε γραμμική ή επίπεδη συστοιχία ανιχνευτών.

Οι οπτικο-ηλεκτρονικοί σαρωτές ανήκουν στην κατηγορία των *σαρωτών κατά μήκος της τροχιάς (*along-track scanners*)* οι οποίοι χρησιμοποιούν την κίνηση του δορυφόρου για την καταγραφή διαδοχικών γραμμών σάρωσης κάθετων στη διεύθυνση της τροχιάς και τη σύνθεση μιας δισδιάστατης εικόνας.

Αντί για κάτοπτρο σάρωσης, χρησιμοποιούν μια γραμμική συστοιχία ανιχνευτών τοποθετημένων στο εστιακό επίπεδο της εικόνας που δημιουργείται από τους φακούς, η οποία ωθείται κατά μήκος της διεύθυνσης τροχιάς του δορυφόρου. Τα συστήματα αυτά καλούνται και ως *σαρωτές σκούπας (*pushbroom scanners*)*, αφού η κίνηση της συστοιχίας ανιχνευτών είναι ανάλογη με την κίνηση των τριχών μιας σκούπας η οποία σκουπίζει το πάτωμα. Κάθε ανιχνευτής της συστοιχίας μετρά την ενέργεια που προέρχεται από ένα κελί ανάλυσης. Για την καταγραφή διάφορων φασματικών περιοχών χρησιμοποιούνται επιπλέον συστοιχίες ανιχνευτών.

