



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

Ηλεκτρομαγνητισμός - Οπτική - Σύγχρονη Φυσική

Ενότητα: Οπτική

Βαρουτάς Δημήτρης
Σχολή Θετικών Επιστημών
Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών



ΟΠΤΙΚΗ (Μάθημα 2)

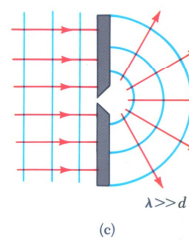
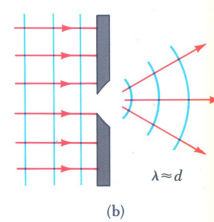
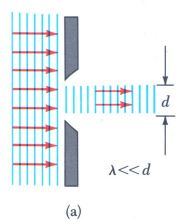
Φύση του φωτός – Γεωμετρική Οπτική

Δ. Βαρουτάς
ΟΠΤΙΚΗ (Ηλεκτρομαγνητισμός Οπτική)



Υπόθεση σημειακής πηγής

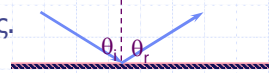
Δ. Βαρουτάς, ΟΠΤΙΚΗ





Ανάκλαση

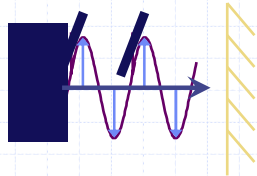
- ◆ Η γωνία πρόσπτωσης ισούται με την γωνία ανάκλασης $\theta_i = \theta_r$ (οι γωνίες μετρώνται από την κάθετο).
- ◆ Οι ακτίνες βρίσκονται στο επίπεδο πρόσπτωσης.



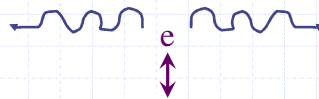
- Επειδή ο νόμος αυτό είναι γενικός, δίνουμε μία εξήγηση υπό την συνθήκη: η επιφάνεια να αποτελεί καλό αγωγό (η ανάκλαση κυριαρχεί σε αυτήν την περίπτωση).

Θεωρούμε προσπίπτον κύμα που πέφτει κάθετα στον αγωγό

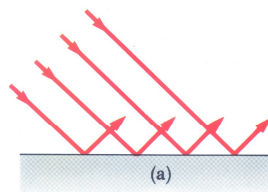
$$E_{\mu} = E_x \cos(kz - \omega t)$$



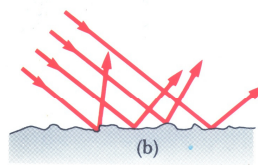
Τα ηλεκτρόνια της επιφάνειας του μετάλλου δέχονται δύναμη $F = eE \rightarrow$ επιτάχυνση \rightarrow ακτινοβολία $\pm \hat{z}$



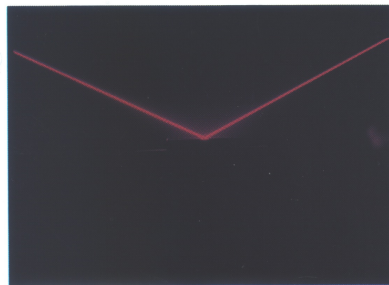
Ανάκλαση - Διάθλαση



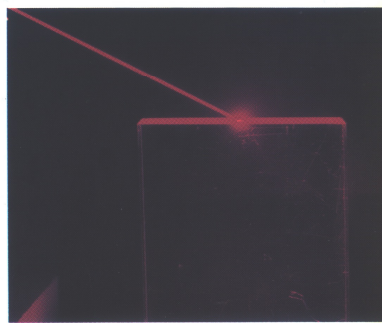
(a)



(b)



(c)



(d)



Διάχυση φωτός κατά την ανάκλαση

Σύμφωνα με την υπέρθεση πεδίων:
(ολικό πεδίο) = (προσπίπτον πεδίο) + (επανακτινοβολούμενο πεδίο).

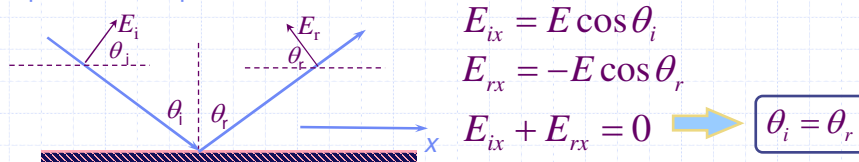
$$E_{\text{tot}} = E_{\text{in}} + E_{\text{rerad}}$$

Γνωρίζοντας πως μέσα στον αγωγό $E_{\text{tot}} = 0$ συμπεραίνουμε:

Το πεδίο που δημιουργείται από τα επιφανειακά ηλεκτρόνια αναιρεί το προσπίπτον κύμα μέσα στον αγωγό, και είναι το ανακλώμενο κύμα.

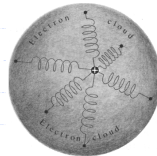
$$E_{\text{rerad}} = -E_{\text{in}}$$

Στην περίπτωση της μη κάθετης πρόσπτωσης οι συνισταμένες του E που είναι παράλληλες στα προσπίπτονα και ανακλώμενα κύματα θα πρέπει να αναιρούνται για τον ίδιο λόγο.

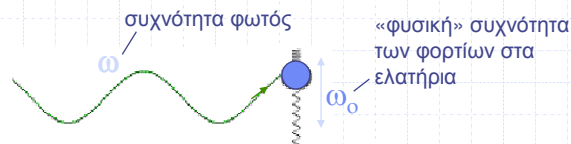


Πώς το φως αλληλεπιδρά με την ύλη;

- ◆ Τα ηλεκτρόνια μπορούν να περιγραφούν ως «φορτία σε ελατήρια» συνδεδεμένα σε άτομα.



- ◆ Το φως αλληλεπιδρά με την ύλη προκαλώντας στα υλικά εσωτερικά φορτία που ταλαντώνονται.



- ◆ Λόγω αδράνειας, τα «συνδεδεμένα» φορτία αντιδρούν νωθρά στο προσπίπτον φως.
Τα φορτία αυτά επανεκπέμπουν κύματα που δεν είναι όμως σε συμφωνία φάσης με το προσπίπτον κύμα.



Δείκτης διάθλασης

- Το φως που πέφτει σε μια επιφάνεια ανακλάται και διαδίδεται στο δεύτερο υλικό. Η ταχύτητα διάδοσης του Η/Μ πεδίου είναι διαφορετική μέσα στο υλικό από ότι στο κενό

- Από τις εξισώσεις Maxwell στο κενό έχουμε: $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$

- Πως διαφοροποιούνται οι εξισώσεις Maxwell στο κενό?

$$\epsilon_0 \rightarrow \epsilon \equiv \epsilon_0 \kappa$$

$$\mu_0 \rightarrow \mu \approx \mu_0 \text{ (για τα περισσότερα υλικά)}$$

- Άρα, η ταχύτητα του φωτός σε ένα υλικό σχετίζεται με αυτήν στο κενό.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} \approx \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \kappa}} \equiv \frac{c}{\sqrt{\kappa}}$$

$$n \approx \sqrt{\kappa} > 1$$

$$v = \frac{c}{n}$$

όπου $n =$ "δείκτης διάθλασης" του υλικού. Ο δείκτης διάθλασης εξαρτάται από την συχνότητα: $n_{\text{μπλε}} = 1.53$ ή $n_{\text{κόκκινο}} = 1.52$

7



Ερώτηση!

Μερικές φορές τα φωτόνια αλληλεπιδρούν με τα άτομα του διηλεκτρικού. Απορροφώνται και επανεκπέμπονται με αποτέλεσμα να επιβραδύνονται. Στην περίπτωση αυτή τα φωτόνια «ταξιδεύουν» με ταχύτητα c .

Αλλιώς το κύμα που διαδίδεται σε ένα στερεό μπορεί να θεωρηθεί συνδυασμός φωτονίων και εικονικών επιδράσεων του με τα άτομα του στερεού. Το κύμα αυτό ταξιδεύει με $v < c$.

Κινούνται τα φωτόνια με την ταχύτητα του φωτός;



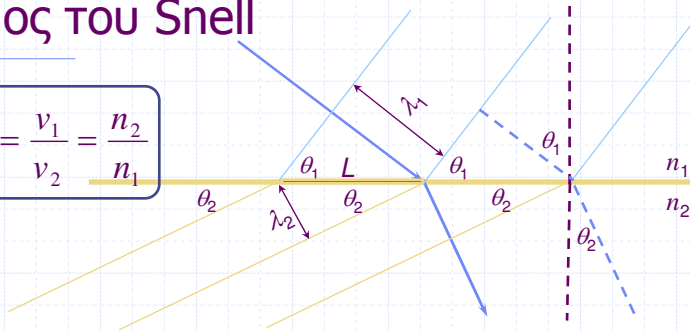
Απορρόφηση και εκπομπή με την ίδια καθυστέρηση φάσης

8



Νόμος του Snell

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$



Τα δύο τρίγωνα έχουν την ίδια υποτείνουσα L

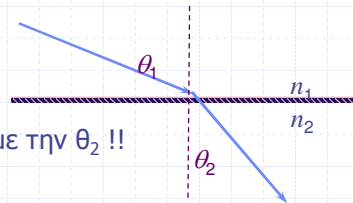
$$\therefore L = \frac{\lambda_2}{\sin \theta_2} = \frac{\lambda_1}{\sin \theta_1} \quad \Rightarrow \quad \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$$

Αλλά, $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad \Rightarrow \quad n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$



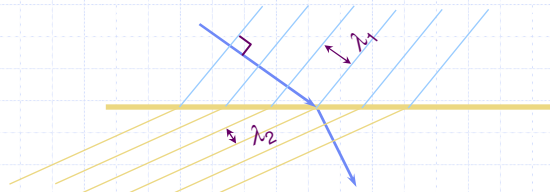
Διάθλαση

Συσχετίζεται η γωνία διάθλασης με την γωνία πρόσπτωσης;



Στην διάθλαση η γωνία θ_1 δεν ισούται με την θ_2 !!

- Γιατί; Θυμηθείτε πως: $v = f\lambda$
- $n_1 \neq n_2 \Rightarrow v_1 \neq v_2$
- Οι συχνότητες όμως (f_1, f_2) θα πρέπει να είναι ίδιες \Rightarrow τα μήκη κύματος πρέπει να αλλάξουν.
- Άρα θ_2 πρέπει να διαφέρει από την θ_1

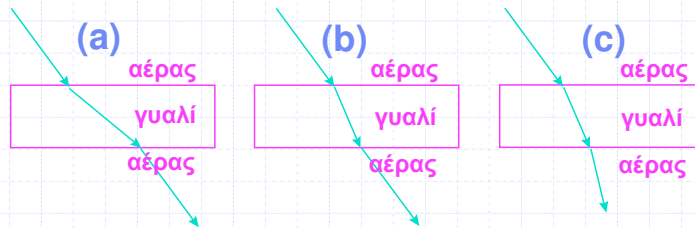


$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$



Ερώτηση !!!

- Ποιο από τα ακόλουθα διαγράμματα αντιπροσωπεύει την διαδρομή μια ακτίνας φωτός από τον αέρα σε γυαλί και πάλι στον αέρα; ($n_{\text{αέρα}}=1$ και $n_{\text{γυαλιού}}=1.5$)

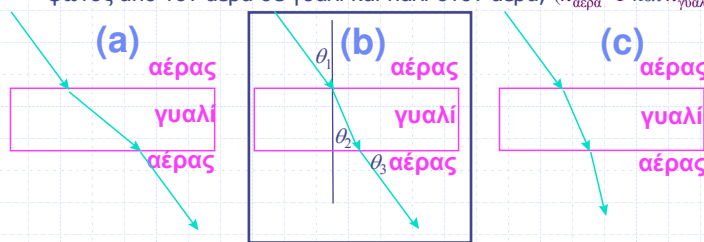


11



Ερώτηση!!

- Ποιο από τα ακόλουθα διαγράμματα αντιπροσωπεύει την διαδρομή μια ακτίνας φωτός από τον αέρα σε γυαλί και πάλι στον αέρα; ($n_{\text{αέρα}}=1$ και $n_{\text{γυαλιού}}=1.5$)



- Η συμπεριφορά της ακτίνας φωτός καθορίζεται από τον νόμο του Snell:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

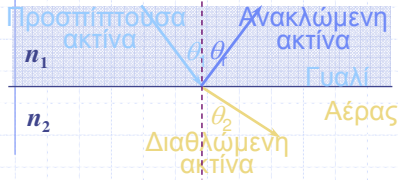
- Αλλά $n_{\text{γυαλιού}} > n_{\text{αέρα}}$, $\sin \alpha_{\text{γυαλιού}} < \sin \alpha_{\text{αέρα}}$
- Συνεπώς η διεύθυνση της ακτίνας μπαίνοντας στο γυαλί θα πλησιάσει την κάθετη στην επιφάνεια πρόσπτωσης.
 - Το οποίο αποκλείει την περίπτωση (a).
- Βγαίνοντας η ακτίνα από το γυαλί στον αέρα η διεύθυνση της απομακρύνεται από την κάθετη στην επιφάνεια πρόσπτωσης.
 - Το οποίο αποκλείει την περίπτωση (c).
- Ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι τελική γωνία θ_3 ισούται με την αρχική θ_1 .

12



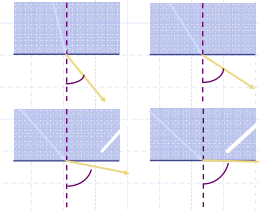
Ολική εσωτερική ανάκλαση

- Ας θεωρήσουμε πως το φως διαδίδεται από το γυαλί ($n_1=1,5$) προς τον αέρα ($n_2=1,0$)



$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{n_1}{n_2} > 1 \Rightarrow \theta_2 > \theta_1$$

Καθώς η ακτίνα του φωτός απομακρύνεται από την κάθετη καθώς η γωνία θ_1 γίνεται ολοένα και μεγαλύτερη, η θ_2 μεγαλώνει και αυτή με μέγιστη όμως τιμή τις 90° .



Γενικά εάν $\sin \theta_1 > (n_2 / n_1)$, δεν υπάρχει ανακλώμενη ακτίνα, οπότε έχουμε **ολική εσωτερική ανάκλαση**.

Παράδειγμα: φως προερχόμενο από νερό που προσπίπτει στον αέρα νερό με γωνία πρόσπτωσης $\theta_1 > \theta_c = \sin^{-1}(1.0/1.5) = 41.8^\circ$ θα ανακλαστεί ολικά. Η ιδιότητα αυτή του φωτός βρίσκει εφαρμογή στις οπτικές ίνες.

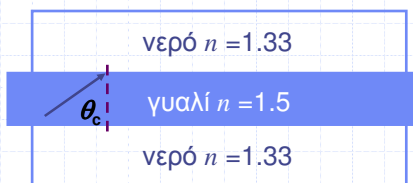


Κρίσιμη γωνία

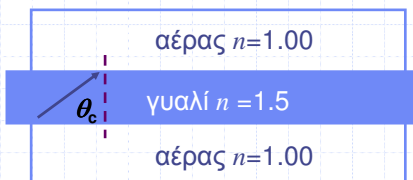
Μία οπτική ίνα περιβάλλεται από διηλεκτρικό. Στην περίπτωση του σχήματος I το διηλεκτρικό αυτό θα θεωρηθεί το νερό (με δείκτη διάθλασης 1,33), ενώ στο σχήμα II το διηλεκτρικό αυτό είναι ο αέρας ($n=1,00$).

Συγκρίνετε τις κρίσιμες γωνίες για ολική εσωτερική ανάκλαση σε κάθε μία από τις δύο περιπτώσεις.

- $\theta_{cI} > \theta_{cII}$
- $\theta_{cI} = \theta_{cII}$
- $\theta_{cI} < \theta_{cII}$



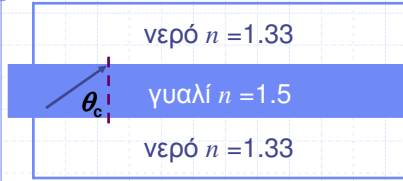
Σχήμα I



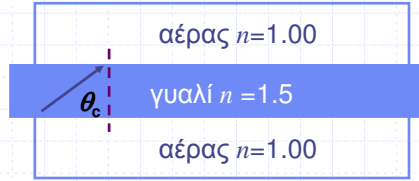
Σχήμα II



Κρίσιμη γωνία



Σχήμα I

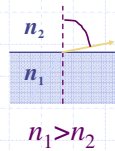


Σχήμα II

a) $\theta_{cI} > \theta_{cII}$

b) $\theta_{cI} = \theta_{cII}$

c) $\theta_{cI} < \theta_{cII}$



Επειδή $n_1 > n_2$ η ολική εσωτερική ανάκλαση θα συμβεί όταν $\theta >$ «κρίσιμη γωνία». Σύμφωνα με τον νόμο του Snell $\sin \theta_c = n_2/n_1$.

Αν $n_2 = 1.0$, τότε θ_c παίρνει την μικρότερή της τιμή. Άρα $\theta_{cI} > \theta_{cII}$.



Πόλωση

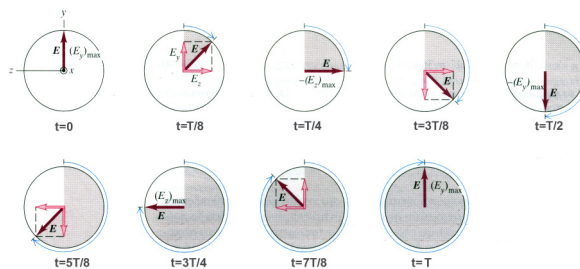
Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μπορεί να έχει κυκλική ή ελλειπτική πόλωση.

◆Κυκλική πόλωση

Προκύπτει από την επαλληλία δύο γραμμικώς πολωμένων κυμάτων τα οποία έχουν ίσα πλάτη και διαφορά φάσης $\pi/2$.

◆Ελλειπτική πόλωση

Προκύπτει από την επαλληλία δύο γραμμικώς πολωμένων κυμάτων τα οποία έχουν διαφορά φάσης διαφορετική από $\pi/2$.

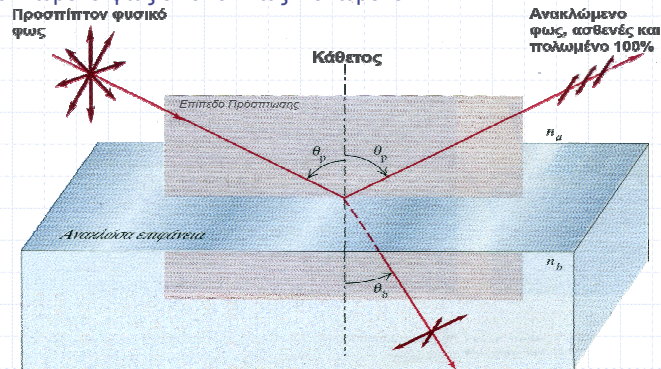




Πόλωση

◆ Πόλωση από ανάκλαση

Όταν φως προσπίπτει στην ανακλώσα επιφάνεια υπό θ_p , τότε η παράλληλη στο επίπεδο πρόσπτωσης συνιστώσα του πεδίου δεν ανακλάται καθόλου, διέρχεται εξολοκλήρου στο δεύτερο μέσο και αποτελεί την διαθλώμενη δέσμη. Το προκύπτων διαθλώμενο φως είναι μερικώς πολωμένο ενώ το ανακλώμενο φως είναι ολικώς πολωμένο.



17



Πόλωση

◆ Γωνία Brewster

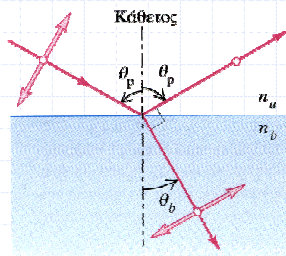
Όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με την γωνία πόλωσης η ανακλώμενη και η διαθλώμενη ακτίνα είναι κάθετες μεταξύ τους. Στην περίπτωση αυτή η γωνία διάθλασης θ_b είναι συμπληρωματική της θ_p και ισχύει

$$\sin\theta_b = \cos\theta_p$$

Σύμφωνα με τον νόμο της διάθλασης ($n_a \sin\theta_p = n_b \sin\theta_b$) η σχέση οπότε καταλήγουμε στην:

$$n_a \sin\theta_b = n_b \cos\theta_p$$

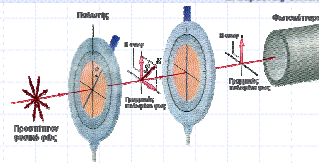
$$\tan\theta_p = \frac{n_b}{n_a} \quad \text{νόμος του Brewster.}$$



18



Πόλωση



◆ Νόμος Malus (Etienne Louis Malus)

Κατά την διέλευση του φωτός από σύστημα ενός πολωτή και ενός αναλυτή, ο λόγος του πλάτους της διερχόμενης προς το πλάτος της προσπίπτουσας δέσμης θα είναι ίσος προς $\cos\phi$ άρα ο λόγος της έντασης της εξερχόμενης προς την προσπίπτουσα δέσμη θα είναι ίσος προς $\cos^2\phi$.

$$I = I_{\max} \cos^2 \phi$$

όπου I_{\max} η μέγιστη ένταση του διερχόμενου φωτός για $\phi=0$ και I η ένταση του διερχόμενου φωτός για γωνία μεταξύ των δύο πολωτών ϕ .

◆ Πόλωση από ανάκλαση

Το μη πολωμένο φως είναι δυνατόν να πολωθεί μερικώς από ανάκλαση όταν προσπίπτει σε ανακλαστική επιφάνεια μεταξύ δυο οπτικών υλικών.

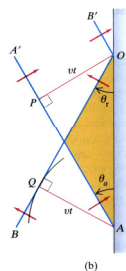
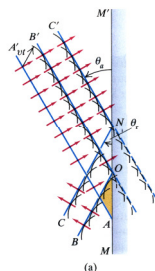
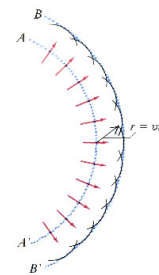
Για μια συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης που ονομάζεται γωνία πόλωσης θ_p ανακλάται μόνο το φως του οποίου το διάνυσμα E είναι κάθετο στο επίπεδο πρόσπτωσης (παράλληλο στην ανακλώσα επιφάνεια). Το ανακλώμενο φως είναι γραμμικά πολωμένο με πόλωση κάθετη στο επίπεδο πρόσπτωσης.



Πόλωση

◆ Αρχή του Huygens

Η αρχή αυτή προτείνει μια γεωμετρική μέθοδο εύρεσης της μορφής του κύματος σε μια μεταγενέστερη χρονική στιγμή αν είναι γνωστή η μορφή του μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Κάθε σημείο του μετώπου ενός κύματος μπορεί να θεωρηθεί ως η πηγή δευτερευόντων μικρών κυμάτων που διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις με ταχύτητα ίση προς την ταχύτητα διάδοσης του κύματος. Το νέο μέτωπο του κύματος κάποια μεταγενέστερη στιγμή χρονική στιγμή κάποια μεταγενέστερη στιγμή ανευρίσκεται από την περιβάλλουσα των κυμάτων.



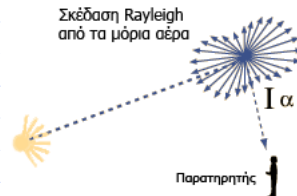
$$APO = OQA$$

$$\left. \begin{aligned} \sin \theta_a &= \frac{u_a t}{AO} \\ \sin \theta_b &= \frac{u_b t}{AO} \end{aligned} \right\} \Rightarrow n_a \sin \theta_a = n_b \sin \theta_b$$



Γιατί ο ουρανός έχει χρώμα μπλε?

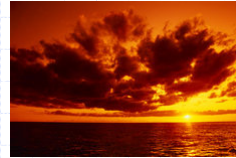
- Το φως από τον ήλιο σκεδάζεται από τα μόρια αέρα που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα της γης – Σκέδαση Rayleigh
 - Η σκέδαση Rayleigh εξαρτάται από το μήκος κύματος.
 - Τα μικρότερα μήκη κύματος (περιοχή του μπλε στο ορατό φάσμα) σκεδάζονται περισσότερο.



Η εξάρτηση της σκέδασης Rayleigh από το μήκος κύματος έχει σαν αποτέλεσμα την ενίσχυση των μικρών μηκών κύματος, με αποτέλεσμα το μπλε χρώμα του ουρανού.

Η σκέδαση στα 400nm είναι 9.4 φορές μεγαλύτερη από την σκέδαση στα 700nm, για την ίδια ένταση προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

- Για τον ίδιο λόγο το ηλιοβασίλεμα είναι **ερυθρό!**
 - Κατά το ηλιοβασίλεμα το φως διανύει μεγαλύτερη απόσταση στην ατμόσφαιρα.
 - Τα μεγάλα μήκη κύματος (ερυθρό - πορτοκαλί) σκεδάζονται λιγότερο...
 - Όσο μεγαλύτερη διαδρομή διανύει το φως στην ατμόσφαιρα, τόσο πιο ερυθρό θα εμφανίζεται στον παρατηρητή.
 - Το φαινόμενο αυτό ενισχύεται όταν υπάρχουν στην ατμόσφαιρα περισσότερα μόρια (πχ, αερολύματα θειαφιού λόγω ατμοσφαιρικής μόλυνσης σε βιομηχανικές περιοχές).



21



Σύνοψη

- ◆ Δείκτης διάθλασης

$$n = \frac{c}{v}$$

- ◆ Ανάκλαση

$$\theta_i = \theta_r$$

- ◆ Διάθλαση

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

- Νόμος του Snell

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

- Ολική εσωτερική ανάκλαση

$$\sin \theta_1 \geq \frac{n_2}{n_1}$$

22

Τέλος

Φύση του φωτός

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» 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.



Σημειώματα

Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, Βαρουτάς Δημήτρης. «Ηλεκτρομαγνητισμός - Οπτική - Σύγχρονη Φυσική. Οπτική». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://opencourses.uoa.gr/courses/DI121/>.



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 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».



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

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

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



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.

