

Κυματική οπτική

Η κυματική οπτική ασχολείται με τη μελέτη φαινομένων τα οποία δεν μπορούμε να εξηγήσουμε επαρκώς με τις αρχές της γεωμετρικής οπτικής. Στα φαινόμενα αυτά περιλαμβάνονται τα εξής:

- Περίθλαση
- Συμβολή
- Πόλωση

Περίθλαση κυμάτων.

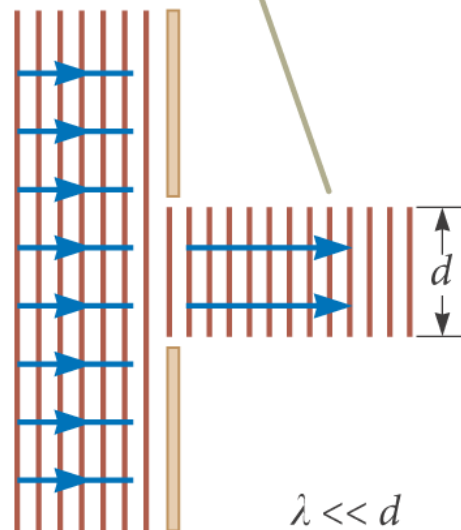


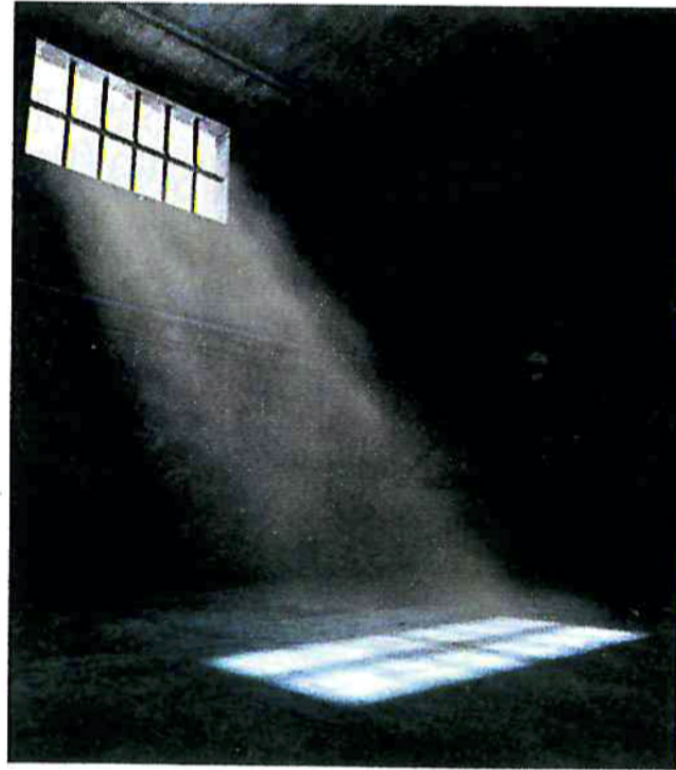
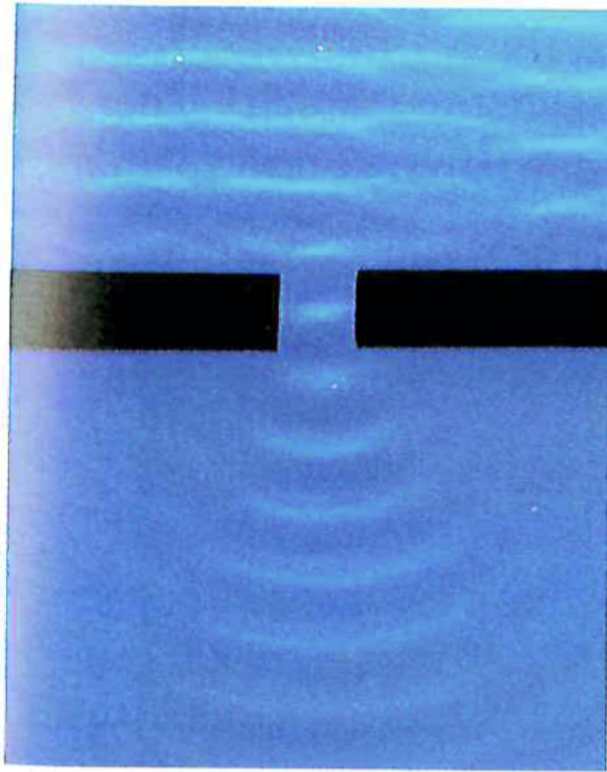
*Η απόκλιση του φωτός από την αρχική ευθεία διάδοσής του (μέσα στο ίδιο υλικό, όταν συναντήσει εμπόδια μικρής διάστασης) ονομάζεται **περίθλαση**.*

Γεωμετρική οπτική (Υπενθύμιση)

Αν ένα κύμα με μήκος λ συναντήσει ένα πέρασμα με οπή διαμέτρου d , και $\lambda \ll d$, τότε το κύμα που εξέρχεται από την οπή συνεχίζει να κινείται ευθύγραμμα (ενδέχεται να υπάρχουν κάποια ανεπαίσθητα φαινόμενα στα χείλη της οπής).

Όταν $\lambda \ll d$, οι ακτίνες συνεχίζουν να διαδίδονται ευθύγραμμα και η προσέγγιση των ακτίνων εξακολουθεί να ισχύει.





Εμφανίζουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα φαινόμενα περίθλασης ή όχι;

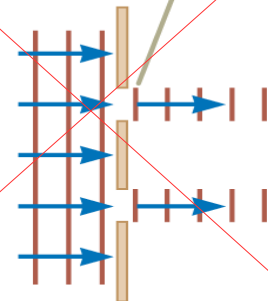
Κυματική οπτική: Φαινόμενο Περίθλασης

Έστω επίπεδο κύμα που συναντάει στο δρόμο του εμπόδιο με διαστάσεις συγκρίσιμες με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, δηλ. το κύμα περνάει μέσα από τις σχισμές με διαστάσεις συγκρίσιμες με το μήκος κύματος.

Το μέρος του κύματος που περνάει από το άνοιγμα **δεν** θα διαδοθεί ευθύγραμμα.

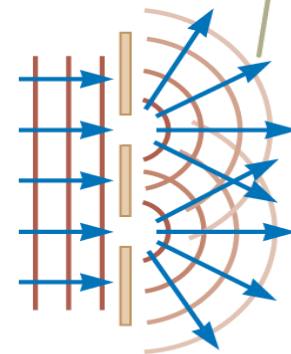
Αντίθετα, μόλις το κύμα εξέλθει από τη σχισμή θα εξαπλωθεί σφαιρικά προς όλες τις κατευθύνσεις.

Το φως που περνά από στενές σχισμές δεν συμπεριφέρεται με αυτόν τον τρόπο.



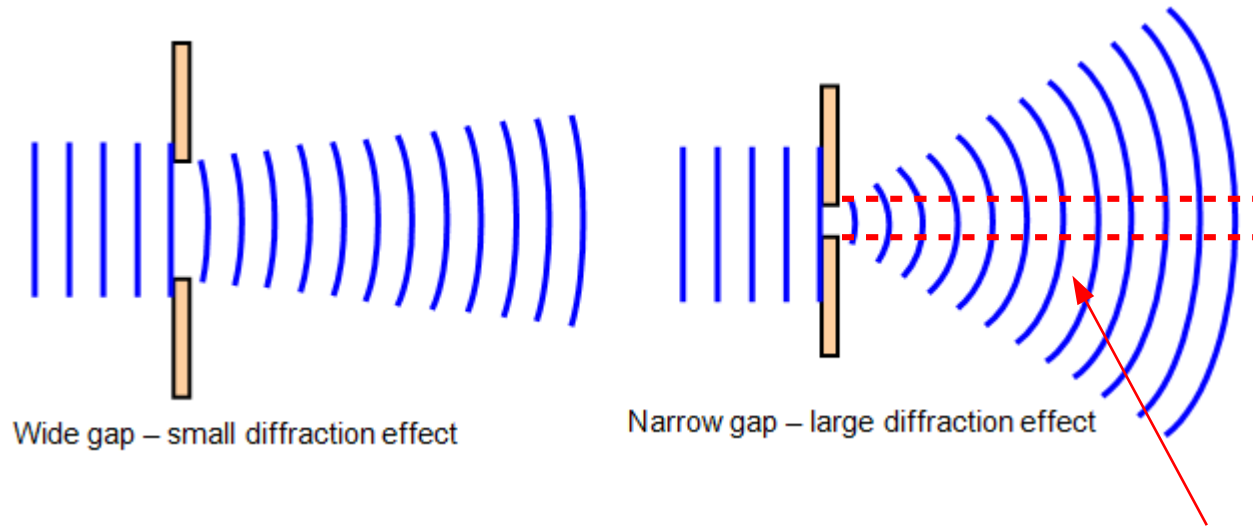
α

Το φως που περνά από στενές σχισμές υφίσταται περίθλαση.



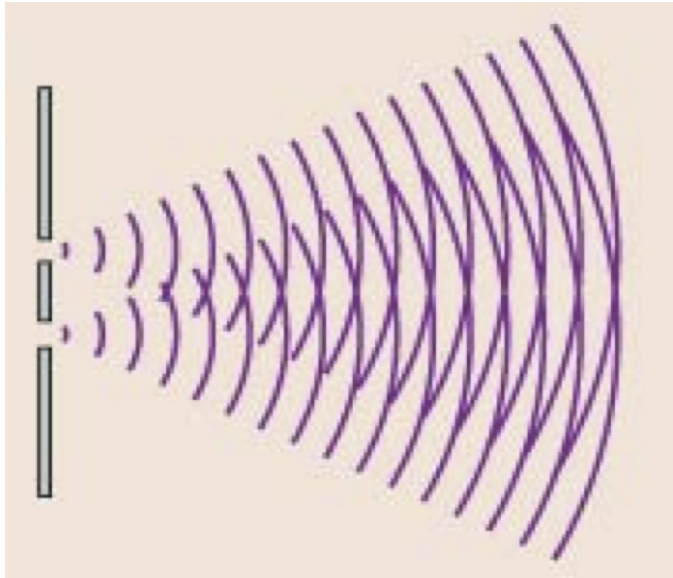
β

<https://sites.google.com/site/thepropertiesofwaves/diffra>



Το φως εισέρχεται σε περιοχή που δεν θα έπρεπε, σύμφωνα με τις αρχές της γεωμετρικής οπτικής.

Όσο μικρότερη η σχισμή, τόσο πιο έντονο το φαινόμενο της περίθλασης.



Φανταστείτε τώρα να έχουμε τη διάχυση του φωτός μέσα από δύο στενές σχισμές.

Ακριβώς λόγω του φαινομένου της περίθλασης, θα παρατηρήσουμε φαινόμενα συμβολής στο χώρο πίσω από τις σχισμές.

Συμβολή: αλληλεπίδραση δύο κυμάτων που διαδίδονται στο ίδιο μέσο, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός κύματος, με το ίδιο, μεγαλύτερο ή μικρότερο πλάτος.

Στην **ενισχυτική συμβολή**, το πλάτος του συνισταμένου κύματος είναι μεγαλύτερο από το πλάτος των επιμέρους κυμάτων.

Στην **καταστρεπτική συμβολή**, το πλάτος του συνισταμένου κύματος είναι μικρότερο από το πλάτος των επιμέρους κυμάτων.

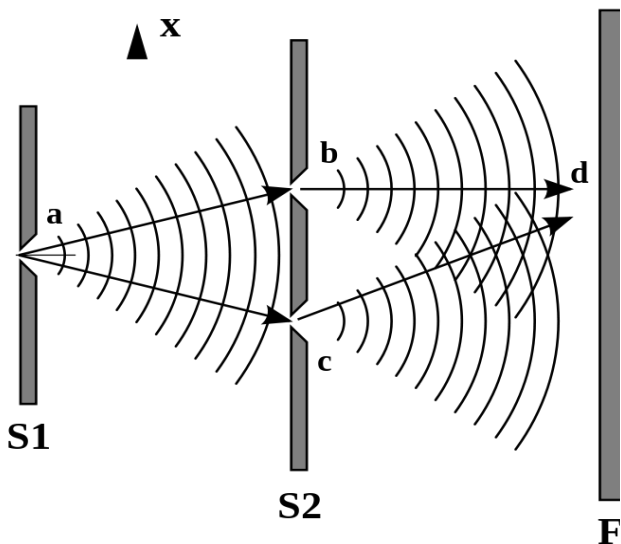
Για να παρατηρηθεί συμβολή κυμάτων φωτός, πρέπει να έχουμε εκπομπή φωτός από πηγές για τις οποίες ικανοποιούνται οι παρακάτω συνθήκες:

- Οι πηγές είναι **σύμφωνες**. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εκπέμπονται από αυτές πρέπει να έχουν σταθερή διαφορά φάσης μεταξύ τους.
- Οι πηγές είναι **μονοχρωματικές**. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να εκπέμπουν κύμα συγκεκριμένου μήκους.

Το πείραμα της διπλής σχισμής του Young

Έστω πέτασμα S1, με μικρή οπή στο κέντρο του (οπή **a**). Έστω ηλιακό φως που προσπίπτει στον στον τοίχο, από αριστερά. Το ηλιακό φως μπορεί να θεωρεί σύμφωνο όταν μελετάμε σημεία σε μία πολύ μικρή επιφάνεια (εκείνη της οπής **a**).

Η οπή **a** λειτουργεί σημειακή πηγή φωτός, που εκπέμπει σφαιρικά κύματα (αν η οπή είναι κυκλική, ή τετράγωνη). Στην εικόνα φαίνονται τα μέτωπα κύματος, δηλαδή ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο έχουν την ίδια τιμή (συνήθως τα μέτωπα κύματος αντιστοιχούν στα μέγιστα των πεδίων και η απόσταση μεταξύ τους αντιστοιχεί στο μήκος κύματος, λ .)



Το φως μετά τη διέλευση του μέσω της οπής **a** διαδίδεται και προσπίπτει στο πέτασμα S2. Το φως που προσπίπτει στις σχισμές **b** και **c** είναι μέρος του ίδιου μέτωπου κύματος και είναι σε φάση.

Λέμε ότι το φως που εκπέμπεται από τις σχισμές **b** και **c** είναι “σύμφωνο”.

Αν οι σχισμές είναι αρκετά μεγάλου μήκους σε σχέση με το πλάτος τους, τα κύματα που εκπέμπονται έχουν κυλινδρικά μέτωπα.

Αν το φως είναι κύμα, τότε, τα φωτεινά κύματα από τις δύο σχισμές θα πρέπει να εμφανίσουν φαινόμενα συμβολής. Δηλ. σε κάθε σημείο του χώρου (άρα και πάνω στην οθόνη) τα κύματα θα πρέπει να αθροίζονται.

Το 1803, ο Thomas Young έδειξε για πρώτη φορά το φαινόμενο της συμβολής κυμάτων φωτός από δύο πηγές.

Λόγω του φαινομένου της συμβολής, το φως από τις δύο σχισμές σχηματίζει μια συγκεκριμένη ορατή εικόνα σε μια οθόνη (“εικόνα συμβολής”).

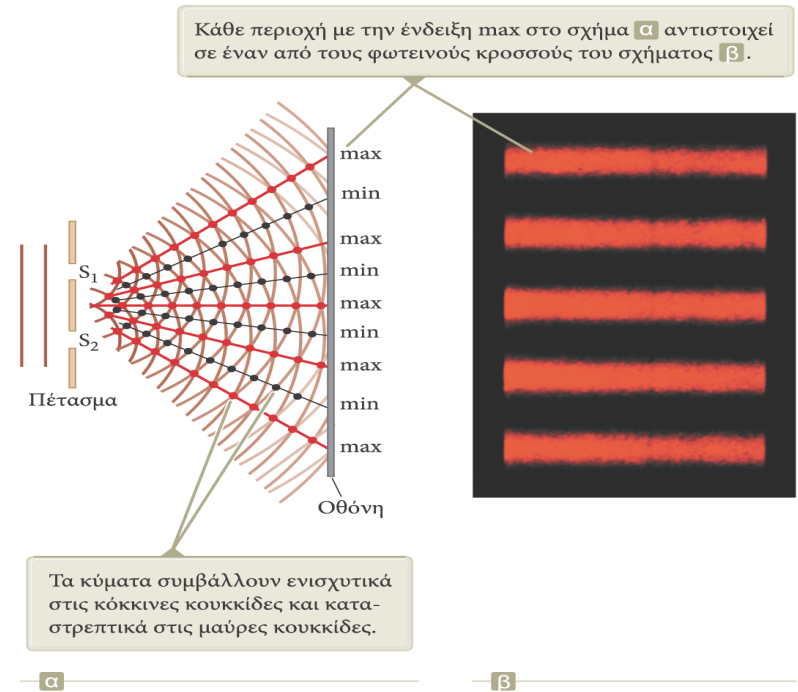
Η εικόνα αποτελείται από μια σειρά φωτεινών και σκοτεινών παράλληλων ζωνών που ονομάζονται *κροσσοί*.

Στα σημεία όπου παρατηρούνται φωτεινοί κροσσοί συμβαίνει *ενισχυτική συμβολή*.

Στα σημεία όπου παρατηρούνται σκοτεινοί κροσσοί συμβαίνει *καταστρεπτική συμβολή*.

Το πείραμα της διπλής σχισμής του Young έδωσε μεγαλύτερη αξιοπιστία στο κυματικό μοντέλο του φωτός. Τότε, ήταν αδιανόητο να θεωρηθεί ότι τα σωματίδια του φωτός μπορούσαν να αλληλοεξουδετερώνονται με αποτέλεσμα να δημιουργούνται σκοτεινοί κροσσοί.

Επίσης το πείραμα του Young παρέχει μια μέθοδο για τη μέτρηση του μήκους.



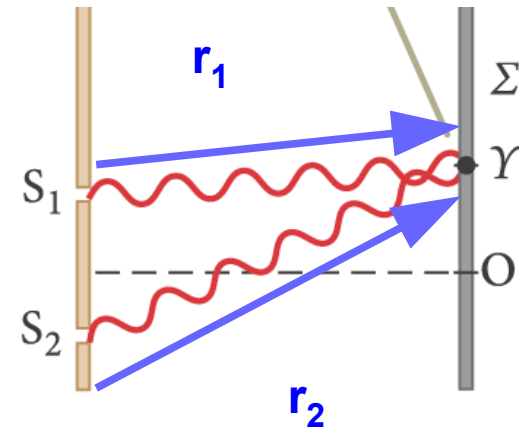
Εξήγηση εικόνας συμβολής

Έστω τυχαίο σημείο, Y , στην οθόνη.

Στο σημείο προσπίπτει κύμα από την σχισμή S_1 που έχει διανύσει απόσταση r_1 και από την οπή S_2 που έχει διανύσει απόσταση r_2 .

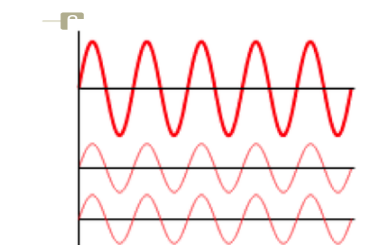
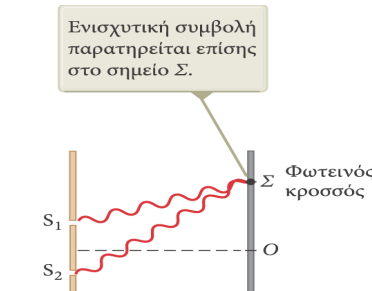
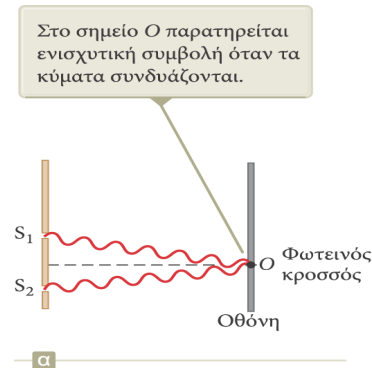
Το κύμα από την κάτω σχισμή πρέπει να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση, σε σχέση με το κύμα που εκπέμπεται από την πάνω σχισμή, για να φτάσει στο σημείο Y .

Αυτή η διαφορά δρόμου θα δημιουργήσει διαφορά φάσης στα δύο κύματα, όταν φθάσουν στο σημείο Y , αν και είχαν εκπεμφθεί με την ίδια φάση.



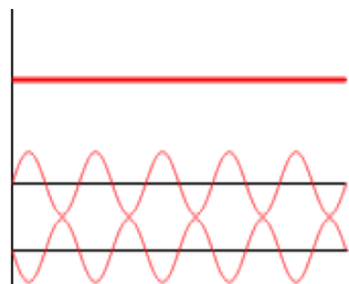
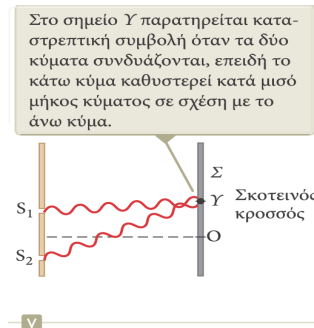
1) Στο σημείο O συμβαίνει ενισχυτική συμβολή. Τα κύματα από τις σχισμές διανύουν την ίδια απόσταση. Επομένως, φτάνουν στο σημείο O χωρίς να έχουν διαφορά φάσης.

Έτσι, συμβάλλουν ενισχυτικά και στο σημείο αυτό σχηματίζεται ένας **φωτεινός κροσσός**.



2) Το κάτω κύμα πρέπει να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση από το επάνω κύμα προκειμένου να φτάσει στο σημείο Σ .

Αν το κάτω κύμα διανύει μεγαλύτερη απόσταση ίση με ένα μήκος κύματος (εν γένει, ακέραιο πολ/σιο του λ) τότε τα κύματα από τις σχισμές φτάνουν στο Σ χωρίς να έχουν διαφορά φάσης. Στο σημείο αυτό σχηματίζεται ένας δεύτερος **φωτεινός κροσσός**.



Αν η διαφορά δρόμου είναι ακέραιο πολ/σιο του $\lambda/2$, τότε τα κύματα από τις σχισμές φτάνουν στο Σ με τη μέγιστη διαφορά φάσης, και συμβάλλουν καταστρεπτικά. Στο σημείο αυτό σχηματίζεται ένας **σκοτεινός κροσσός**.

Αλλαγές φάσης λόγω ανάκλασης

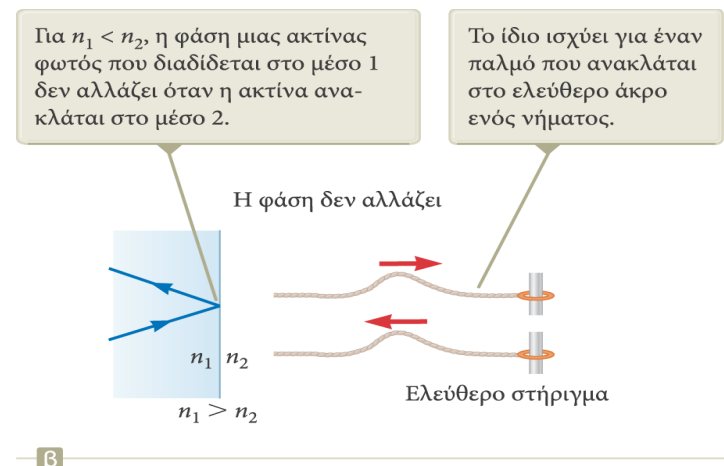
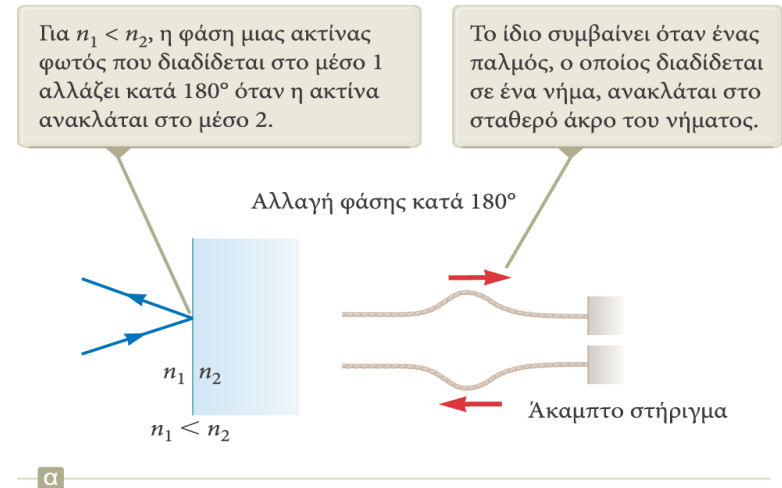
Μέχρι τώρα είδαμε την εμφάνιση διαφοράς φάσης σε αρχικώς σύμφωνα κύματα λόγω της διαφοράς στο μήκος της διαδρομής που ακολούθησαν.

Κατά την ανάκλαση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε ένα μέσο που έχει μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης απ' ό,τι έχει το μέσο στο οποίο διαδίδεται το κύμα, η φάση του κύματος αλλάζει κατά 180° .

- Αυτό είναι ανάλογο με έναν παλμό, ο οποίος διαδίδεται σε ένα νήμα και ανακλάται σε ένα άκαμπτο στήριγμα.

Η φάση δεν αλλάζει όταν το κύμα ανακλάται στο όριο με κάποιο μέσο το οποίο έχει μικρότερο δείκτη διάθλασης.

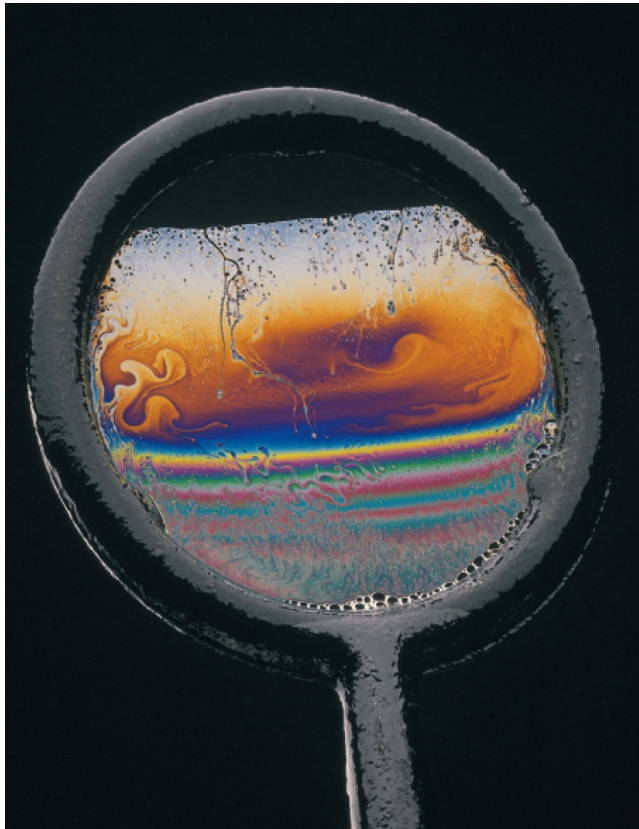
- Αυτό είναι ανάλογο με έναν παλμό, ο οποίος διαδίδεται σε ένα νήμα και ανακλάται σε ένα ελεύθερο στήριγμα.



Συμβολή σε λεπτά υμένια

Λεπτά υμένια ονομάζουμε ορισμένες λεπτές, διαφανείς μεμβράνες (όπως π.χ. Σαπουνόφουσκες, κηλίδα λαδιού, πετρελαίου κλπ).

Τα φαινόμενα συμβολής σε λεπτά υμένια (μεμβράνες) είναι πολύ συνηθισμένα. Τα διάφορα χρώματα που παρατηρούνται όταν το λευκό φως προσπίπτει σε τέτοια υμένια οφείλονται στη συμβολή των κυμάτων που ανακλώνται στις δύο επιφάνειες του υμενίου.



Συμβολή σε λεπτά υμένια –
Παράδειγμα σαπουνόφουσκας

Συμβολή σε λεπτά υμένια

Υποθέτουμε ότι οι ακτίνες φωτός που διαδίδονται στον αέρα είναι σχεδόν κάθετες στις δύο επιφάνειες του υμενίου.

Η φάση της ακτίνας 1 αλλάζει κατά 180° σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτίνα.

Η ακτίνα 2, η οποία ανακλάται στην κάτω επιφάνεια, δεν υφίσταται αλλαγή φάσης σε σχέση με το προσπίπτον κύμα. Ωστόσο διανύει επιπλέον απόσταση $2t$ προτού τα κύματα συνδυαστούν ξανά.

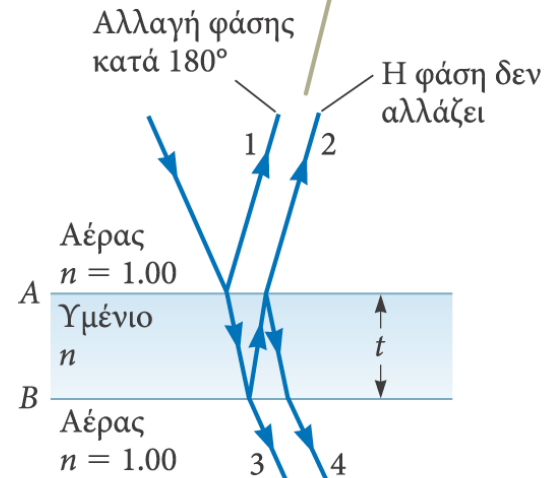
Συνθήκη ενισχυτικής συμβολής

- $2nt = (m + \frac{1}{2})\lambda$ ($m = 0, 1, 2 \dots$)
 - Η συνθήκη αυτή λαμβάνει υπόψη τόσο τη διαφορά στο μήκος της οπτικής διαδρομής των δύο ακτίνων όσο και την αλλαγή φάσης κατά 180° .

Συνθήκη καταστρεπτικής συμβολής

- $2nt = m\lambda$ ($m = 0, 1, 2 \dots$)

Η συμβολή του φωτός που ανακλάται σε ένα λεπτό υμένιο οφείλεται στον συνδυασμό των ακτίνων 1 και 2, οι οποίες ανακλώνται στην άνω και στην κάτω επιφάνεια του υμενίου.

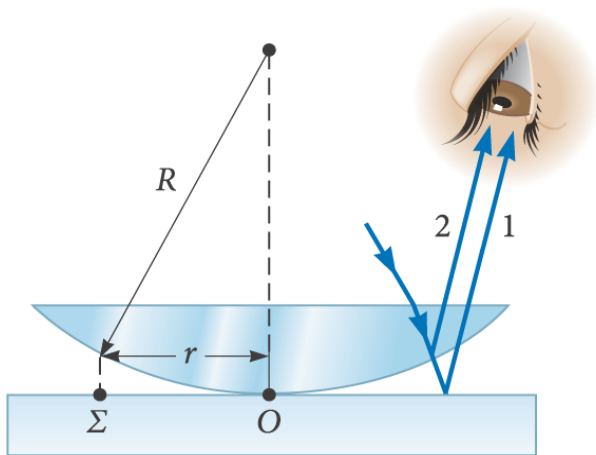


Οι ακτίνες 3 και 4 προκαλούν φαινόμενα συμβολής στο φως που μεταδίδεται μέσω του υμενίου.

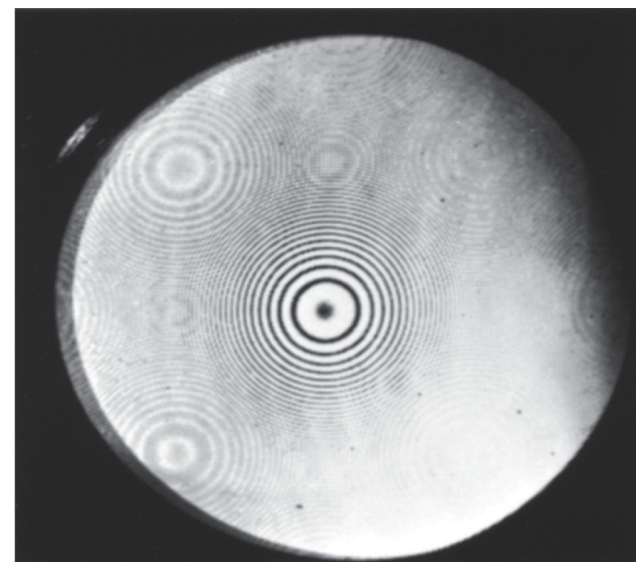
Οι δακτύλιοι του Νεύτωνα

Μπορούμε να παρατηρήσουμε συμβολή κυμάτων φωτός τοποθετώντας έναν επιπεδόκυρτο φακό πάνω από μια επίπεδη γυάλινη επιφάνεια. Το πάχος του υμενίου του αέρα που βρίσκεται ανάμεσα στο γυαλί και στην επιφάνεια μεταβάλλεται από μηδέν στο σημείο επαφής μέχρι κάποια τιμή t .

Παρατηρούμε μια εικόνα συμβολής με φωτεινούς και σκοτεινούς δακτυλίους (ονομάζονται δακτύλιοι του Νεύτωνα). Οι δακτύλιοι του Νεύτωνα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο των οπτικών φακών.



α



β

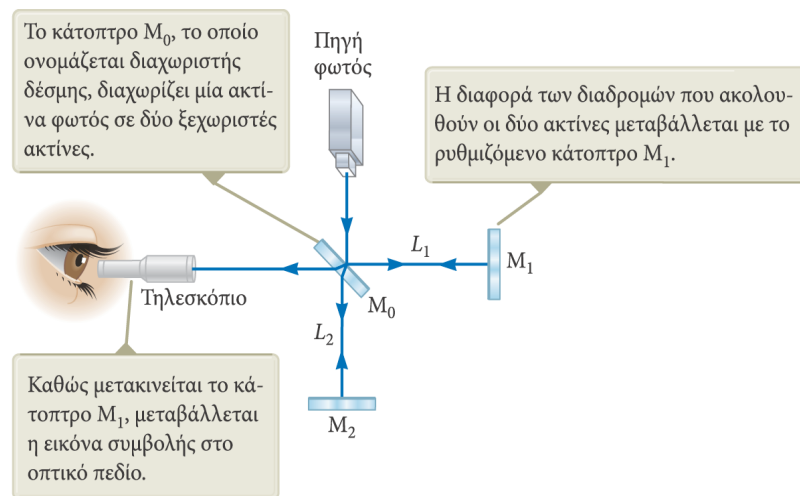
Το συμβολόμετρο του Michelson – Σχηματικό διάγραμμα

Το συμβολόμετρο εφευρέθηκε από τον Αμερικανό φυσικό A.A. Michelson.

Μια ακτίνα φωτός χωρίζεται σε δύο ακτίνες από το κάτοπτρο M_0 . Το κάτοπτρο σχηματίζει γωνία 45° με την προσπίπτουσα δέσμη και ονομάζεται *διαχωριστής δέσμης*. Μεταδίδει το μισό φως και ανακλά το υπόλοιπο.

Η ανακλώμενη ακτίνα κατευθύνεται προς το κάτοπτρο M_1 . Η μεταδιδόμενη ακτίνα κατευθύνεται προς το κάτοπτρο M_2 .

Οι δύο ακτίνες ακολουθούν τις διαφορετικές διαδρομές L_1 και L_2 . Αφού οι ακτίνες ανακλαστούν στα κάτοπτρα M_1 και M_2 , τελικά συνδυάζονται πάλι στο M_0 και δημιουργούν μια εικόνα συμβολής.



Το συμβολόμετρο του Michelson – Λειτουργία

Η συνθήκη συμβολής για τις δύο ακτίνες προσδιορίζεται από τη διαφορά στα μήκη των διαδρομών τους.

Το κάτοπτρο M_1 μπορεί να μετακινηθεί. Καθώς μετακινείται, η εικόνα των κροσσών συρρικνώνεται ή επεκτείνεται, ανάλογα με την κατεύθυνση προς την οποία μετακινείται το M_1 . Η εικόνα των κροσσών μετατοπίζεται κατά μισό κροσσό κάθε φορά που το M_1 μετακινείται κατά απόσταση $\lambda/4$.

Η συσκευή υπολογίζει το μήκος κύματος του φωτός μετρώντας το πλήθος των μετατοπίσεων των κροσσών που παρατηρούνται για μια δεδομένη μετακίνηση του M_1 .

Ανιχνευτής κυμάτων βαρύτητας με συμβολόμετρο λέιζερ

Η γενική θεωρία της σχετικότητας προβλέπει την ύπαρξη κυμάτων βαρύτητας.

Στη θεωρία του Αϊνστάιν, η βαρύτητα ισοδυναμεί με στρέβλωση του χώρου. Αυτές οι στρεβλώσεις διαδίδονται στον χώρο.

Ο ανιχνευτής κυμάτων βαρύτητας με συμβολόμετρο λέιζερ έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να ανιχνεύει τη στρέβλωση που προκαλείται από μια διαταραχή, η οποία διέρχεται από τη Γη.

Το συμβολόμετρο χρησιμοποιεί δέσμες λέιζερ με ενεργό μήκος διαδρομής αρκετών χιλιομέτρων.

Στο άκρο του ενός βραχίονα του συμβολόμετρου, υπάρχει ένα κάτοπτρο προσαρμοσμένο σε ένα τεράστιο εκκρεμές.

Όταν περάσει ένα κύμα βαρύτητας, το εκκρεμές κινείται, με αποτέλεσμα να αλλάζει η εικόνα συμβολής των δύο δεσμών λέιζερ που εκπέμπουν οι δύο βραχίονες.

Ο ανιχνευτής LIGO στο Ρίτσαντ της Ουάσιγκτον

