

Περίθλαση φωτός από συμπαγή δίσκο (CD)

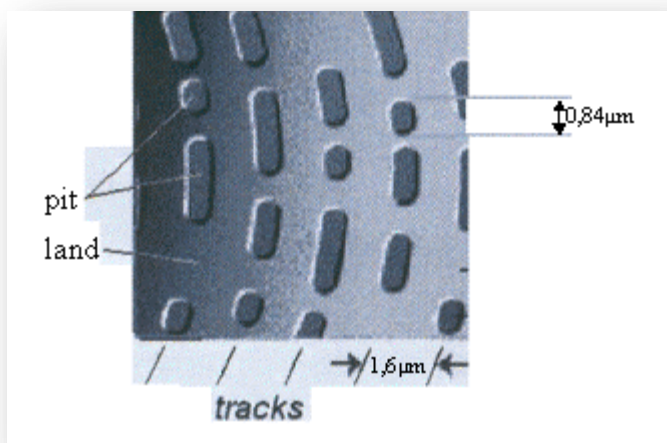
Επίδειξη-Πείραμα

Σκοπός

Με την άσκηση αυτή θέλουμε να εξοικειωθούν οι μαθητές με τα φαινόμενα της συμβολής και περίθλασης, χρησιμοποιώντας ένα καθημερινό και πολύ οικείο αντικείμενο όπως είναι ένα CD και μέσα από την παρατήρηση και εξερεύνηση να δώσουν μια ποιοτική εξήγηση του φαινομένου. Να ανατρέξουν σε εικόνες “που βλέπουν στη φύση” και στηρίζονται στο ίδιο φαινόμενο της περίθλασης, να “δουν” πώς “εφαρμόζεται” η φυσική στη φύση. Να χρησιμοποιήσουν τη μαθηματική ανάλυση του φαινομένου έτσι ώστε μέσα από ένα πείραμα να μετρήσουν την απόσταση των γραμμών (tracks) στην επιφάνεια ενός CD.

Η επιφάνεια ενός CD

Η επιφάνεια ενός CD είναι λεία και μπορεί να ανακλά το φως που πέφτει πάνω του. Στην επιφάνειά του έχουν “χαραχθεί” ομόκεντροι (ακριβέστερα σπειροειδείς) κύκλοι, τα λεγόμενα tracks, οι οποίοι δεν είναι παρά οι γραμμές επάνω στις οποίες αποθηκεύονται, κατά τη διαδικασία εγγραφής ενός CD, τα δεδομένα. Η δέσμη που χρησιμοποιείται, εστιάζομενη “καίει” την επιφάνειά του, αποτυπώνοντας στίγματα (μικρά βαθουλώματα pits) κατά μήκος κάθε γραμμής, διαμορφώνοντας μ’ αυτόν τον τρόπο την ανακλαστικότητα στα σημεία αυτά. Οι περιοχές ανάμεσα στα βαθουλώματα ονομάζονται land. Η ανάγνωση του CD γίνεται με την αντίστροφη διαδικασία: τα σημεία αυτά ανιχνεύονται, ως φορείς της αποθηκευμένης πληροφορίας, ανάλογα αν ανακλάται σε αυτά ή όχι η δέσμη φωτός του Laser. Τα tracks στα κανονικά, μικρής χωρητικότητας CD απέχουν $1,6\mu\text{m}$. Ένα τέτοιο σύστημα γραμμών αποτελεί ιδανικό φράγμα περίθλασης για το φως που ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του CD.



Ουράνια τόξα από ένα CD

Στο περιοδικό *The Physics teacher*¹, παρουσιάστηκε μία άσκηση κατά την οποία είναι εφικτό οι μαθητές, να παρατηρήσουν το ουράνιο τόξο που σχηματίζεται από ανάκλαση φωτός πάνω σ' ένα CD, όπως φαίνεται στην εικόνα.

Μια καλή ιδέα για να προκαλέσουμε το ενδιαφέρον τους, είναι να δείξουμε παράλληλα και μια εικόνα ενός ουράνιου τόξου, που σχηματίζεται στη φύση και να παροτρύνουμε τους μαθητές να συγκρίνουν.

Ίσως τότε, κάποιοι παρατηρητικοί, ανακαλύψουν ότι οι εικόνες μοιάζουν, αλλά δεν είναι εντελώς ίδιες. Για παράδειγμα το φάσμα από το CD περιέχει το χρώμα magenta (μωβ), ένα χρώμα που λείπει από το φυσικό ουράνιο τόξο. Έτσι, γνωρίζοντας ότι το μωβ χρώμα προέρχεται από την ανάμειξη του κόκκινου και του μπλε, μπορούμε από μια μόνο παρατήρηση να έχουμε μια πρώτη επισήμανση: το κόκκινο και το μπλε φως μετά από τη περίθλαση πάνω στο CD συναντιούνται στα ίδια σημεία.

Το επόμενο βήμα είναι να ρωτήσουμε τι προβλέπουν οι μαθητές ότι θα γίνει, αν καλύψουμε τη μισή επιφάνεια του CD μ' ένα αδιαφανές πέτασμα. Είναι πολύ πιθανόν οι περισσότεροι να απαντήσουν ότι απλά θα “χαθεί” η μισή εικόνα του φάσματος. Τότε η επίδειξη του φαινομένου μάλλον θα τους ξαφνιάσει, αφού όπως φαίνεται και

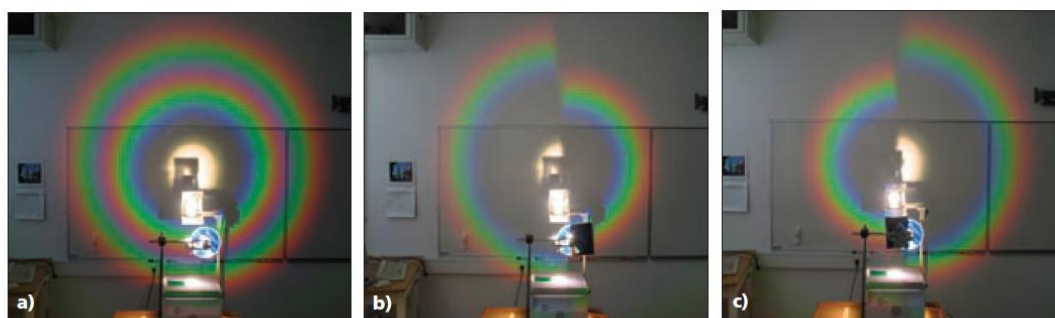


Fig. 1. (a) Rainbow-like spectrum caused by light reflection from a CD. (b) Spectrum obtained when the right-hand side of the CD is blocked with an opaque card. (c) Spectrum obtained when the left-hand side of the CD is blocked with an opaque card.

στην εικόνα όταν το δεξί μισό του CD είναι καλυμμένο τότε “εξαφανίζεται” το δεξί εξωτερικό και αριστερό εσωτερικό κυκλικό τμήμα του φάσματος. Επιπρόσθετα, ίσως κάποιοι παρατηρήσουν ότι ταυτόχρονα δεν εμφανίζεται πια το μωβ χρώμα. Με τέτοιου είδους επιδείξεις, μπορούμε να αυξήσουμε την προσοχή και το ενδιαφέρον των

¹ <http://dx.doi.org/10.1119/1.2971214> (Δωρεάν πρόσβαση)

μαθητών ώστε να παρακολουθήσουν την διαδικασία μάθησης με περισσότερο ενδιαφέρον.

Κατ' αρχήν η εξήγηση των παραπάνω φαινομένων πρέπει να επικεντρωθεί στα παρακάτω σημεία:

- Οι μαθητές να κατανοήσουν πώς το CD δουλεύει σαν φράγμα περίθλασης,
- Στο πώς διαμορφώνεται η εικόνα περίθλασης όταν χρησιμοποιηθεί μονοχρωματικό φως προερχόμενο από ένα laser και πώς αυτή η εικόνα εξαρτάται από το μήκος κύματος του φωτός που χρησιμοποιείται.
- Να καταλάβουν πώς όταν χρησιμοποιηθεί μια εκτεταμένη δέσμη μονοχρωματικού φωτός, τα μέγιστα του διαμορφώματος περίθλασης θα επεκταθούν και αυτά πάνω στην οθόνη παρατήρησης.
- Πώς διαμορφώνεται η εικόνα περίθλασης όταν μια εκτεταμένη δέσμη μονοχρωματικού φωτός με διάμετρο ίση ή μεγαλύτερη από τη διάμετρο ενός CD) πέσει κάθετα στην επιφάνεια του CD.

Η ποιοτική εξήγηση του διαμορφώματος που προκύπτει όπως φαίνεται στις εικόνες Fig1(b) και Fig1(c), καλό θα ήταν να έρθει σε δεύτερη φάση ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

Παρατηρούμε την εικόνα περίθλασης που δίνει μια παράλληλη δέσμη πράσινου φωτός καθώς ανακλάται στην επιφάνεια του CD. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας ένα επιδιασκόπιο (*overhead projector*). Για να περιορίσουμε το φως που προέρχεται από το σκεδαζόμενο φως στη τάξη, τοποθετούμε πάνω στον projector ένα αδιαφανές πέτασμα με ένα κυκλικό άνοιγμα περίπου 7cm και ένα πράσινο φίλτρο πάνω σ' αυτό. Η εικόνα που παίρνουμε φαίνεται στην επόμενη εικόνα Fig(2a)

Παρατηρούμε δύο ομόκεντρους φωτεινούς κύκλους και μία κεντρική φωτεινή περιοχή. Θα μπορούσε κάποιος να σκεφτεί ότι η κεντρική περιοχή προέρχεται από τη ανάκλαση του φωτός πάνω στο CD (φωτεινό μέγιστο μηδενικής τάξης) και οι δύο συμμετρικοί κύκλοι αντιστοιχούν στο πρώτο και στο δεύτερο μέγιστο περίθλασης. Το πρώτο τμήμα της εξήγησης είναι σωστό, το δεύτερο όμως όχι.

Από τη θεωρία είναι γνωστό ότι για ένα φράγμα περίθλασης τα μέγιστα σχηματίζονται σε γωνίες θ_N για τις οποίες ισχύει: $d \sin \theta_N = N\lambda$

Οπότε αν θεωρήσουμε για το πράσινο φως $\lambda \approx 550nm$ και $d = 160nm$ τότε από την παραπάνω εξίσωση μπορούμε να υπολογίσουμε ότι, το πρώτο και το δεύτερο μέγιστο περίθλασης θα εμφανίζονται στις 20° και 45° . Αυτές όμως οι τιμές δεν συμφω-

νούν με τις πειραματικές παρατηρήσεις. Με κάποιες απλές μετρήσεις μπορούμε να υπολογίσουμε ότι οι δύο κύκλοι εμφανίζονται σε γωνίες πολύ κοντά στις 20° . Μήπως λοιπόν και οι δύο πράσινοι κύκλοι ανήκουν στο πρώτο μέγιστο περίθλασης;

Η απάντηση σ' αυτήν την απρόσμενη ερώτηση μπορεί να βρεθεί αν προσπαθήσουμε να κατανοήσουμε πια είναι η πιθανή αιτία και διαχωρίζονται οι δύο κύκλοι.

Καλύπτουμε το

CD μ' ένα μαύρο

χαρτί αφήνοντας

μόνο μια ακτινι-

κή σχισμή όπως

φαίνεται στο

σχήμα Fig2(b). Η

εικόνα του δια-

μορφώματος πε-

ρίθλασης φαίνε-

ται τότε στο

σχήμα Fig2(c).

Συγκρίνοντας τις

εικόνες 2(a) και

2(c), μπορεί κά-

ποιος να παρα-

τηρήσει ότι το

αριστερό και δεξί

μέγιστο στη φωτογραφία 2(c)

εμφανίζονται στις θέσεις του ε-

ξωτερικού και εσωτερικού δα-

κτυλίου περίθλασης της εικόνας

2(a). Εάν η σχισμή επεκταθεί σ'

όλη τη διάμετρο του CD, τότε θα

εμφανιστούν δύο σεί που αντι-

στοιχούν σε μέγιστα περίθλασης

Η εικόνα αυτή έχει αποτυπωθεί

σχηματικά στο σχήμα Fig3. Είναι

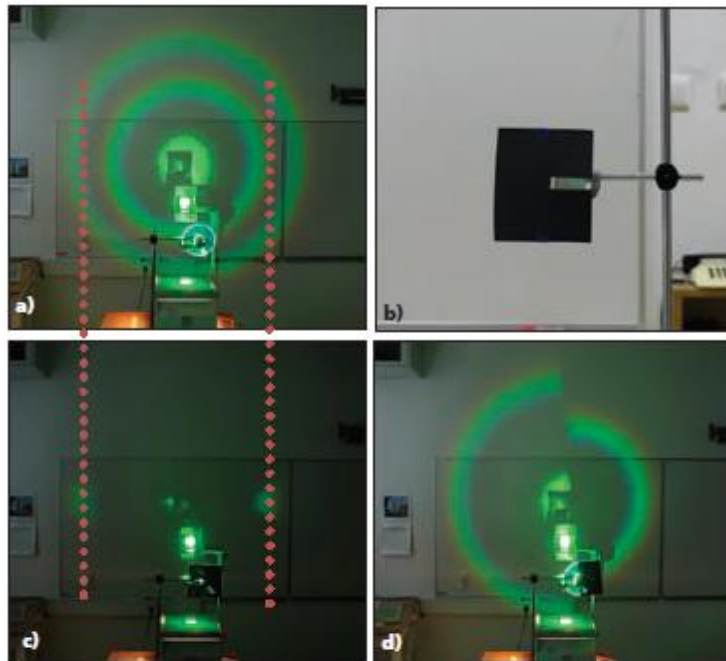


Fig. 2. (a) Diffraction pattern when the CD is uniformly illuminated with green light. (b) Black paper mask covering all but a radial strip of the CD. (c) Diffraction pattern with the mask in place. (d) Diffraction pattern when the right half of the CD is blocked with an opaque card. The red dashed lines shows the correspondence between the diffraction maxima in cases (a) and (c).



Fig. 3. Two sets of diffraction maxima (zero and first order) are formed in the plane through the CD diameter when monochromatic light is incident on a CD. For clarity, one set is shown in gray.



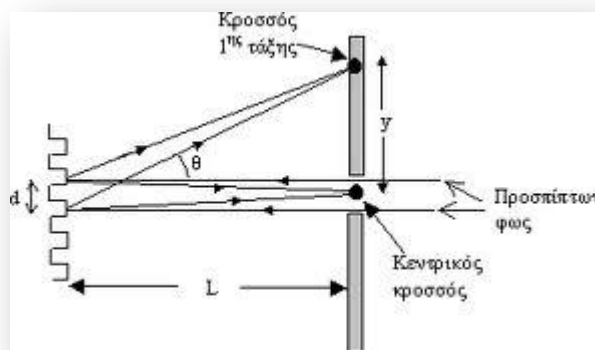
Fig. 4. The appearance of a magenta color in CD "rainbow." For clarity, only the red-green-blue light components and only half of the first-order maxima are shown.

σημαντικό να σημειώσουμε ότι σε ορισμένη απόσταση από το CD, τα δύο μέγιστα που προέρχονται από το ίδιο μέρος του CD εμφανίζονται σε αντίθετες πλευρές του άξονα που περνά από τη μέση της επιφάνειας του CD. Το σχήμα (d) της Fig2. δείχνει το διαμόρφωμα περίθλασης που σχηματίζεται όταν καλύψουμε με μαύρο χαρτί το μισό δεξιό τμήμα του. Αυτή την εικόνα μπορούμε να τη συνθέσουμε νοητικά, αν περιστρέψουμε τη σχισμή της εικόνας Fig2(c) κατά 180° σημειώνοντας τις θέσεις όπου παρουσιάζονται τα μέγιστα περίθλασης. Το ίδιο πρόβλημα μπορεί να γίνει κατανοητό και από το σχήμα Fig(3). Αν καλυφθεί το δεξί τμήμα του CD, τότε θα εξαφανιστούν το αριστερό εσωτερικό και το δεξί εξωτερικό μέγιστο περίθλασης (στο σχήμα Fig3 τα παραπάνω μέγιστα έχουν αποτυπωθεί με πράσινο χρώμα). Έτσι, η εικόνα περίθλασης που φαίνεται όταν το CD δεν είναι καλυμμένο μπορεί να θεωρηθεί ότι σχηματίζεται από τη περιστροφή των μεγίστων που περιγράψαμε παραπάνω κατά 360° . Με την ίδια μεθοδολογία μπορούμε να ερμηνεύσουμε το σχηματισμό του φάσματος όταν το CD φωτίζεται με λευκό φως. Το σχήμα Fig4 εξηγεί σ' αυτήν περίπτωση την εμφάνιση του μωβ χρώματος στο φάσμα. Τώρα είναι εύκολο να κατανοήσουμε και την εξαφάνιση του χρώματος αυτού όταν καλυφθεί η μισή επιφάνεια του CD με μαύρο χαρτί, μια που τότε δε θα υφίσταται αλληλοεπικάλυψη του μπλε και κόκκινου χρώματος. Είναι πάντως αξιοσημείωτο πώς από μια απλή παρατήρηση της εικόνας περίθλασης του μονοχρωματικού φωτός, μπορέσαμε να δώσουμε μια ποιοτική εξήγηση του όλου φαινομένου. Ενός φαινομένου που στα μάτια και στο μυαλό των μαθητών δε θα πρέπει να μείνει μόνο στα στενά όρια της επιφάνειας ενός CD. Εντυπωσιακές εικόνες γύρω μας δεν είναι τίποτα άλλο από “εικόνες – διαμορφώματα περίθλασης”, όπως τα φωτεινά χρώματα, στα φτερά των παγωνιών, της πεταλούδας *Morpho*, του σκαθαριού *Chrysochroa fulminans*. Βαθουλώματα δεν έχει μόνο η επιφάνεια ενός CD αλλά και η επιφάνεια πολλών κοχυλιών και κάποιων θαλάσσιων φυτών που αντανακλούν το φως που πέφτει επάνω τους δίνοντας μοναδικές εικόνες. Ίσως με κάποια τέτοια παραδείγματα πετύχουμε να εντυπωσιάσουμε και ταυτόχρονα να διαμορφώσουμε κατάλληλα την άποψη των μαθητών περί φυσικής και φύσης.

Πειραματική διαδικασία – Μετρήσεις

Μια παρόμοια πειραματική διάταξη² μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση των αποστάσεων ανάμεσα στα tracks πάνω σ' ένα CD, φτάνει να είναι γνωστό το μήκος κύματος φωτός που χρησιμοποιεί ένα Laser pointer.

Το Laser τοποθετείται, με τη βοήθεια μιας κοινής λαβίδας εργαστηρίου που στηρίζεται σε βάση, σε οριζόντια θέση, απέναντι από το CD και σε απόσταση περίπου 10cm από αυτό, έτσι ώστε η δέσμη φω-



τός να πέφτει κάθετα στην επιφάνεια του CD και η ανάκλαση της δέσμης να επιστρέφει σ' αυτό. Η ακριβής ρύθμιση της καθετότητας της δέσμης μπορεί να γίνει εύκολα με μια κατασκευή τριών βιδών που ενσωματώνεται στο στήριγμα στο οποίο τοποθετείται το CD.

Η στόχευση της δέσμης γίνεται στη μέση της επιφάνειας του CD, αριστερά ή δεξιά της κεντρικής οπής. Οι δύο κροσσοί περίθλασης που προβάλλονται στο πέτασμα και φαίνονται ως δύο φωτεινά σημεία, είναι κροσσοί ενισχυτικής συμβολής, πρώτης τάξης. Αυτοί βρίσκονται εκατέρωθεν του κεντρικού, μηδενικής τάξης κροσσού και απέχουν μεταξύ τους απόσταση $2y$. Ο τελευταίος δεν φαίνεται αφού η ανάκλαση της δέσμης σκιάζεται από το ίδιο το Laser.

Από τη γεωμετρία του σχήματος έχουμε:

$$\sin \theta = \frac{y}{\sqrt{L^2 + y^2}}$$

που σε συνδυασμό με τη σχέση, γνωστή ως “τύπος περίθλασης του φράγματος”

$$d \cdot \sin \theta = m \cdot \lambda \text{ για } m = 1 \text{ παίρνουμε}$$

$$d = \frac{\sqrt{L^2 + y^2}}{y} \cdot \lambda$$

Μετράμε με μετροταινία (με ακρίβεια χιλιοστού) την απόσταση L , από την επιφάνεια του CD έως το πέτασμα και την απόσταση $2y$. Απομακρύνουμε το CD από το

² Σιανούδης Ι, Πειράματα οπτικής, Αθήνα, Λύχνος 2005 σελ.206-212

Laser, μεταβάλλοντας έτσι την απόσταση L. Επαναλαμβάνουμε τις προηγούμενες μετρήσεις και συμπληρώνουμε τον παρακάτω πίνακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΙΜΩΝ			$\lambda = \dots\dots\dots nm$		
	Απόσταση κροσσών $2x \text{ mm}$	Απόσταση CD - πέτασμα $L \text{ mm}$	$\sin \theta = \frac{y}{\sqrt{y^2 + L^2}}$	$d = \frac{\lambda}{\sin \theta}$	Μέση τιμή της απόστασης $d \text{ } \mu m$

Πίνακας

Χρησιμοποιώντας λοιπόν το μήκος κύματος μιας ορατής ακτινοβολίας μπορέσαμε να μετρήσουμε αποστάσεις μικρότερες και από το πάχος μιας ανθρώπινης τρίχας!

Η απόσταση μεταξύ των tracks μπορεί να θεωρηθεί γνωστή, αφού αποτελεί ένα βιομηχανικό πρότυπο **1,6 μm** και έτσι η παραπάνω διάταξη να χρησιμοποιηθεί αντίστροφα, για τη μέτρηση δηλ. του μήκους κύματος του φωτός του Laser pointer.