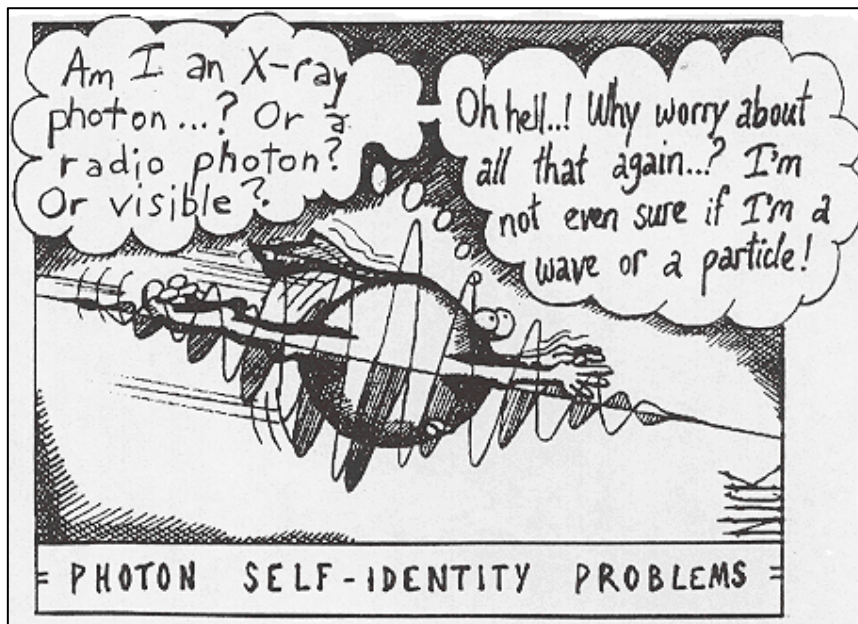


Φως

Κύμα ή σωματίδιο;

Εισαγωγή σε βασικές έννοιες της κβαντικής φυσικής



Ίδρυμα Ευγενίδου

Κωνσταντίνος Μουστάκας: Φυσικός

Δημήτριος Σταθόπουλος: Δρ. Αστροφυσικής

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή	σελ. 1
2.	Πειραματικό μέρος	σελ. 4
2.1.	Ανάκλαση και διάθλαση	σελ. 4
2.1.1.	Ο νόμος της ανάκλασης	σελ. 4
2.1.1.1.	Πειραματική διαδικασία	σελ. 4
2.1.2.	Ο νόμος της διάθλασης	σελ. 6
2.1.2.1.	Πειραματική διαδικασία	σελ. 7
2.2.	Ο Newton και το φως	σελ. 9
2.2.1.	Το κρίσιμο πείραμα του Newton	σελ. 9
2.2.1.1.	Πειραματική διαδικασία	σελ. 11
2.3.	Ο Grimaldi και το φαινόμενο της περίθλασης	σελ. 12
2.3.1.	Το φαινόμενο της περίθλασης	σελ. 12
2.3.1.1.	Πειραματική διαδικασία	σελ. 12
2.4.	Η κυματική φύση του φωτός σύμφωνα με τον Huygens	σελ. 14
2.4.1.	Η αρχή του Huygens	σελ. 14
2.4.1.1.	Πειραματική διαδικασία	σελ. 15
2.5.	Το πείραμα της διπλής οπής του Young	σελ. 22
2.5.1.	Πειραματική διαδικασία	σελ. 22
2.5.1.1.	Περίθλαση και συμβολή μηχανικών κυμάτων	σελ. 22
2.6.	Η φωτεινή κηλίδα του Fresnel (ή Poisson ή Arago)	σελ. 26
2.6.1.	Ερμηνεία του φαινομένου	σελ. 26
2.6.1.1.	Πειραματική διαδικασία	σελ. 27
2.7.	Η πόλωση του φωτός	σελ. 30
2.7.1.	Μηχανικό ανάλογο της πόλωσης του φωτός	σελ. 30
2.7.1.1.	Πειραματική διαδικασία	σελ. 30
2.8.	Εργαστήριο-Μέτρηση της ταχύτητας του φωτός	σελ. 33
2.8.1.	James Clerk Maxwell και η ηλεκτρομαγνητική θεωρία	σελ. 33
2.8.2.	Κύματα	σελ. 33
2.8.2.1.	Μηχανικά κύματα	σελ. 34
2.8.2.2.	Ηλεκτρομαγνητικά κύματα	σελ. 35
2.8.2.3.	Θεμελιώδης εξίσωση της κυματικής	σελ. 36
2.8.2.4.	Στάσιμα κύματα	σελ. 37
2.8.3.	Πειραματική διαδικασία	σελ. 38
2.8.3.1.	Οδηγίες	σελ. 38
2.8.3.2.	Εξήγηση	σελ. 38
2.9.	Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο	σελ. 42
2.9.1.	Πειραματική διαδικασία	σελ. 44
2.9.1.1.	Πειραματική διαδικασία	σελ. 44
2.9.2.	Συμπεράσματα	σελ. 46
2.10.	Εργαστήριο-Μέτρηση της σταθεράς του Planck	σελ. 47
2.10.1.	Πειραματική διαδικασία	σελ. 47
2.11.	Περίθλαση ηλεκτρονίων	σελ. 55

2.11.1. Νοητικό πείραμα: Περίθλαση ηλεκτρονίων από διπλή σχισμή	σελ. 55
2.11.2. Ερμηνείες της κβαντικής μηχανικής	σελ. 62
2.11.2.1. Η ερμηνεία της Κοπεγχάγης	σελ. 62
2.11.2.2. Τα πολλαπλά Σύμπαντα	σελ. 63
2.12. Η αρχή της απροσδιοριστίας του Heisenberg	σελ. 64
2.13. Το φαινόμενο Casimir και το «γεμάτο» κενό	σελ. 66
2.13.1. Ερμηνεία του φαινομένου	σελ. 66
2.13.2. Μηχανικό ανάλογο του φαινομένου Casimir	σελ. 68
2.13.2.1. Πειραματική διαδικασία	σελ. 68
3. Φύλλο αξιολόγησης	σελ. 71
4. Βιβλιογραφία	σελ. 78

1. Εισαγωγή

Οι πρώτες μελέτες οι οποίες είχαν να κάνουν με το φως αφορούσαν κατά κύριο λόγο την κατανόηση της όρασης. Για παράδειγμα, οι αρχαίοι Αιγύπτιοι πίστευαν ότι το φως ήταν το αποτέλεσμα της δραστηριότητας του θεού Ρα. Όταν το μάτι το Ρα ήταν ανοιχτό ήταν μέρα ενώ όταν ήταν κλειστό είχαμε νύχτα.

Παρόλα αυτά οι πρώτες μελέτες, βασισμένες σε λογικούς συλλογισμούς, που αφορούσαν το φως και την όραση, αποδίδονται στους αρχαίους Έλληνες φιλοσόφους. Οι θεωρίες τους προσπαθούσαν να ερμηνεύσουν την όραση αλλά και τον τρόπο με τον οποίο ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται το σχήμα, το μέγεθος, και το χρώμα αντικειμένων που βρίσκονται πολύ κοντά ή πολύ μακριά του.

Οι αρχαίοι Έλληνες στην προσπάθειά τους να εξηγήσουν πως λειτουργεί η όραση διατύπωσαν δύο κυρίως θεωρίες. Σύμφωνα με την πρώτη το φως θεωρήθηκε ως μία εσωτερική φωτιά που ξεκινά από το εσωτερικό του οφθαλμού και εξέρχεται από την κόρη. Κατά την έξοδό του το φως μπορούσε να αλληλεπιδράσει με τον υλικό κόσμο και ανακλώμενο να επιστρέψει στον οφθαλμό δημιουργώντας την αίσθηση της όρασης. Κατά τη δεύτερη θεωρία, πίστευαν ότι το φως εκπέμπεται από την επιφάνεια των υλικών αντικειμένων και ότι τα μάτια μας ήταν παθητικοί δέκτες όλων των φωτεινών ακτίνων που εκπέμπονται από τα υλικά αντικείμενα που μας περιβάλλουν.

Ο Αλκμαίων ο Κροτωνιάτης (570 - 500 π.Χ.), Πυθαγόρειος φιλόσοφος, θεμελιωτής της Ελληνικής Ιατρικής, είναι ο πρώτος που έκανε ανατομικές μελέτες του οφθαλμού σε ζώα, περιέγραψε το οπτικό νεύρο και συσχέτισε τα αισθητήρια όργανα με τον εγκέφαλο. Για την «ερμηνεία της όρασης» υπέθεσε την ύπαρξη «εσωτερικού πυρός» εντός του οφθαλμού, το οποίο «εκβάλλεται» προς τα έξω.

Ο Εμπεδοκλής ο Ακραγαντίνος (494 - 434 π. Χ.), πίστευε ότι ο οφθαλμός αποτελείται από «Υδωρ» και «Πυρ» και ότι η οπτική αίσθηση δημιουργείται από την αλληλοεπίδραση μεταξύ του εξωτερικού πυρός και του εσωτερικού πυρός.

Ο Δημόκριτος από τα Άβδηρα (460 - 370 π. Χ.) μαζί με το διδάσκαλό του τον Λεύκιππο, πρώτος υποστήριξε ότι το φως είναι μία ενέργεια αποκλειστικώς εξωτερικής προελεύσεως. Πίστευε ότι η οπτική αίσθηση δημιουργείται από την αλληλοεπίδραση λεπτών «Υλικών εικονίων» (φωσφαινίων ή ειδωλίων), που συνίστανται από «άτομα» ευρισκόμενα στον αέρα, τα οποία ταξιδεύουν και αντιδρούν με το «εσωτερικό φως» του οφθαλμού. Σύμφωνα με το Δημόκριτο *«κάποια ομοιώματα που ξεκολλούν από τα αντικείμενα έχοντας σχήμα όμοιο μ' αυτά πάνε και πέφτουν πάνω στα μάτια αυτών που βλέπουν κι έτσι παράγεται η αίσθηση της όρασης»*.

Ο Πλάτων (427 - 347 π. Χ.) στο έργο του «Τίμαιος» αναφέρει ότι «οι ακτίνες του φωτός» εκπέμπονται από τον οφθαλμό (το οπτικό πυρ) και σχηματίζουν με «το εξωτερικό φως» (το ρευστό πυρ) το «σώμα της οράσεως» (τον οπτικό κώνο), το οποίο ανακλώμενο ξανά στον οφθαλμό μεταφέρεται στον εγκέφαλο, θέτοντας έτσι τις βάσεις της «αισθητηριακής υποδοχής» του φωτός. Σύμφωνα με την αναλογία της μίξεως των σωματιδίων του «οπτικού πυρός» και του «ρευστού πυρός», δημιουργείται η αίσθηση των χρωμάτων.

Ο Αριστοτέλης (384-322 π. Χ.), απέρριπτε, όπως και ο Δημόκριτος, «το οπτικό πυρ» ως αιτία δημιουργίας της οράσεως και παραδεχόταν την διείσδυση των φωτεινών ακτίνων από τον εξωτερικό κόσμο εντός των οφθαλμών, όπου δημιουργείτο το

φαινόμενο του «μετασχηματισμού» των φωτεινών ακτίνων με την εξήγηση της «αυτοαναλαμπής» εντός του οφθαλμού.

Ο Ευκλείδης, ο πατέρας της Γεωμετρίας, (306 - 283 π. Χ.), έθεσε πρώτος μέσω των μαθηματικών τα θεμέλια της «Γεωμετρικής Οπτικής» και το έργο του «Οπτικά», είναι το πρώτο βιβλίο που αναφέρεται στο φως και στη σχέση του με την όραση. Ο Ευκλείδης εισήγαγε την έννοια της φωτεινής ακτίνας η οποία αναπαρίσταται γεωμετρικά από μια ευθεία γραμμή. Ο Ευκλείδης τις ακτίνες τις αντιμετώπιζε ως λεπτές ίνες φωτός οι οποίες, ξεκινώντας από τα μάτια, ταξίδευαν ευθύγραμμα προς συγκεκριμένη κατεύθυνση. Έτσι, πρότεινε ότι η όραση αποτελεί μια σύνθεση όλων των αντικειμένων που βρίσκονται μέσα σε ένα κώνο ακτίνων φωτός του οποίου η κορυφή βρίσκεται στο κέντρο του ματιού του παρατηρητή.

Ο Ήρων ο Αλεξανδρεύς (10-70 μ. Χ.) επέκτεινε τις αρχές της γεωμετρικής οπτικής προκειμένου να μελετήσει το πρόβλημα της ανάκλασης του φωτός από ομαλές επιφάνειες. Συνδυάζοντας τις αρχές του Ευκλείδη με την ιδέα ότι οι φωτεινές ακτίνες ακολουθούν τη συντομότερη οδό κατά τη διάδοσή τους κατάφερε να εξηγήσει και να περιγράψει με μαθηματικούς όρους το φαινόμενο της ανάκλασης.

Ο Κλαύδιος Πτολεμαίος (100-170 μ. Χ.) μελέτησε το φαινόμενο της διάθλασης μέσω λεπτομερών πειραμάτων και κατέληξε ότι όταν το φως διαδίδεται από ένα μέσο σε ένα άλλο, ο λόγος της γωνίας πρόσπτωσης προς την γωνία διάθλασης είναι σταθερός και εξαρτάται από τις ιδιότητες των δύο υλικών. Σημειώνεται πως η σχέση μεταξύ της γωνίας πρόσπτωσης και της γωνίας διάθλασης που βρήκε ο Πτολεμαίος δεν ήταν ακριβής για μεγάλες γωνίες.

Πολύ σπουδαία συνεισφορά στην ανάπτυξη της οπτικής είχαν οι Άραβες επιστήμονες με σημαντικότερο τον Ibn al-Haytham ή Alhazen (965-1040). Ο Alhazen μελέτησε τους Έλληνες φιλοσόφους, και πραγματοποίησε σειρά εμπειρικών ερευνών στην Οπτική (Howards & Rogers, 1995; Howard, 1996; Smith, 1998; Rahim & Rodrigues, 2015). Εξέτασε την ανατομία των οφθαλμών διαφόρων ζώων και μελέτησε τη φυσιολογία τους με σκοπό να κατανοήσει τον τρόπο λειτουργίας τους. Μέσω των μελετών του ο Alhazen, υποστήριξε πως το φως ήταν καθαρά ένα εξωτερικό φαινόμενο που φώτιζε τα αντικείμενα τριγύρω μας, το οποίο ανακλώμενο στην επιφάνειά τους αλληλεπιδρά με το μάτι δημιουργώντας την αίσθηση της όρασης. Με τον τρόπο αυτό διέψευσε την θεωρία του Πλάτωνα καθώς αν το φως προερχόταν από τον οφθαλμό τότε κάποιος θα μπορούσε να βλέπει το βράδυ εξ ίσου καλά όπως και κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Παρά το γεγονός ότι ο Alhazen ανέστρεψε την αίσθηση περί της κατεύθυνσης των ακτίνων, όπως την εξέφρασε ο Ευκλείδης και ο Πλάτων, εν τούτοις επιβεβαίωσε τη γεωμετρική προσέγγιση των Ελλήνων φιλοσόφων, ότι δηλαδή οι φωτεινές ακτίνες διαδίδονται σε ευθεία γραμμή και ότι ακολουθούν τη συντομότερη διαδρομή μεταξύ του αντικειμένου και του ματιού.

Κατά το 12^ο και 13^ο αιώνα, τα βασικότερα κέντρα μάθησης βρίσκονται πια στα πανεπιστήμια που δημιουργούνται στις πόλεις της Ευρώπης, όπως, στο Παρίσι, Οξφόρδη κ.λπ. Στους δύο αυτούς αιώνες η μελέτη γύρω από το φως περιορίζεται στην κατασκευή και τη βελτίωση φακών, κατόπτρων και γενικά οπτικών οργάνων που ενισχύουν την όραση.

Κατά τη διάρκεια της Αναγέννησης η Οπτική και η μελέτη του φωτός γνώρισε μεγάλη άνθιση. Όσον αφορά τη φύση του φωτός αξίζει να αναφερθεί η συνεισφορά του Rene Descartes (1596-1650) ο οποίος στο σύγγραμμά του *La Dioptrique* εισηγήθηκε

την ιδέα ότι το φως διαδίδεται σε ένα ελαστικό μέσο, τον αιθέρα, και αποτελείται από μικροσκοπικά σωματίδια. Μέσω αυτών των υποθέσεων κατάφερε να εξηγήσει το νόμο του Snell (Sabra 1981).

2. Πειραματικό μέρος

2.1. Ανάκλαση και διάθλαση

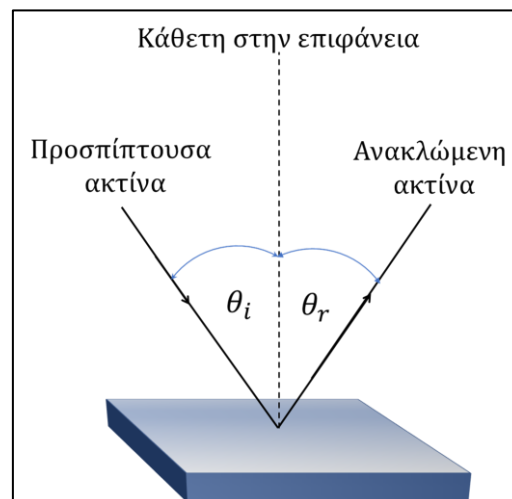
2.1.1. Ο νόμος της ανάκλασης

Όταν το φως συναντήσει την επιφάνεια ενός σώματος και αλλάξει διεύθυνση διάδοσης παραμένοντας μέσα στο ίδιο διαφανές υλικό, λέμε ότι ανακλάται.

Όταν μια πολύ λεπτή φωτεινή δέσμη (όπως η δέσμη laser) πέφτει στην επιφάνεια ενός καθρέφτη, μετά την ανάκλαση, ακολουθεί μια εντελώς καθορισμένη διεύθυνση. Το είδος αυτής της ανάκλασης το καλείται κατοπτρική ανάκλαση (Εικόνα 1).

Ανεξάρτητα από τη διεύθυνση της προσπίπτουσας ακτίνας μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι:

- η προσπίπτουσα, η ανακλώμενη ακτίνα και η κάθετη ευθεία επάνω στον καθρέφτη (στο σημείο πρόσπτωσης) βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο.
- η γωνία πρόσπτωσης (θ_i) είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης (θ_r)



Εικόνα 1. Μια φωτεινή δέσμη ανακλάται από επίπεδο κάτοπτρο. Όπως είναι εμφανές η προσπίπτουσα, η ανακλώμενη ακτίνα και η κάθετη ευθεία επάνω στον καθρέφτη (στο σημείο πρόσπτωσης) βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο, ενώ η γωνία πρόσπτωσης ισούται με τη γωνία ανάκλασης

2.1.1.1. Πειραματική διαδικασία

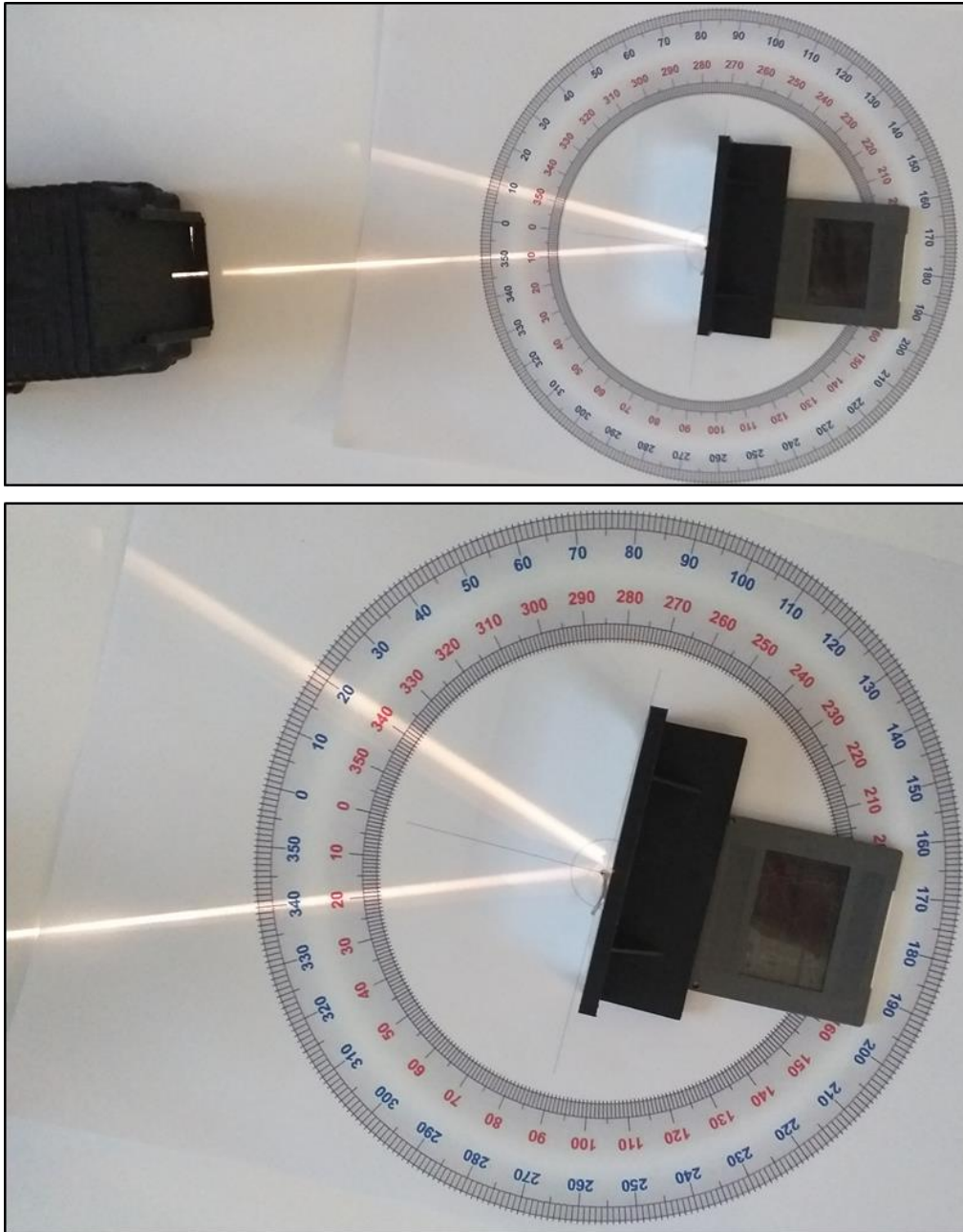
Οι μαθητές/τριες καλούνται να εξαγάγουν τον νόμο της ανάκλασης.

Υλικά

- Μια πηγή laser πράσινου χρώματος
- Έναν μικρό καθρέπτη

- Έναν γωνιομετρικό δίσκο (παρέχεται στο τέλος του εγγράφου) ο οποίος να περιστρέφεται γύρω από το κέντρο του.

Στερεώνουμε τον καθρέπτη στο κέντρο του γωνιομετρικού δίσκου όπως φαίνεται στην Εικόνα 2. Με ένα καρφί, το οποίο τοποθετούμε στο κέντρο του γωνιομετρικού δίσκου, τον στερεώνουμε πάνω σε μια ξύλινη επιφάνεια έτσι ώστε ο δίσκος να μπορεί να περιστρέφεται περί το κέντρο του. Σε απόσταση περίπου 30 cm στερεώνουμε την πηγή φωτός έτσι ώστε η φωτεινή δέσμη να πέφτει κάθετα πάνω στον καθρέπτη. Περιστρέφουμε τον γωνιομετρικό δίσκο κατά διαφορετικές γωνίες και καταγράφουμε τόσο την γωνία πρόσπτωσης όσο και την γωνία ανάκλασης.



Εικόνα 2. Πειραματική διάταξη μελέτης του νόμου της ανάκλασης. Στο σχήμα διακρίνονται η γωνία πρόσπτωσης και η γωνία ανάκλασης οι οποίες είναι ίσες.

2.1.2. Ο νόμος της διάθλασης

Όταν το φως περνά από ένα διαφανές υλικό σε ένα άλλο διαφανές υλικό, στο οποίο διαδίδεται με διαφορετική ταχύτητα, η διεύθυνση διάδοσής του αλλάζει. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται **διάθλαση**. Όπως γνωρίζουμε, η ταχύτητα του φωτός στο νερό, στο γυαλί κ.α. είναι μικρότερη από την ταχύτητα του φωτός στον αέρα. Λέμε ότι αυτά τα υλικά είναι **οπτικά πυκνότερα από τον αέρα**. Βέβαια, το φως διαδίδεται με την μεγαλύτερη ταχύτητα στο κενό.

Ο λόγος της ταχύτητας του φωτός στο κενό (c), προς την ταχύτητα του (u) στο υλικό

$$n=c/u$$

ονομάζεται δείκτης διάθλασης (n) του οπτικού υλικού.

Ο δείκτης διάθλασης είναι ένα αδιάστατο μέγεθος και για οποιοδήποτε υλικό είναι μεγαλύτερος της μονάδας. Επειδή η ταχύτητα του φωτός στον αέρα είναι περίπου ίση με την ταχύτητα με την οποία διαδίδεται στο κενό ο δείκτης διάθλασης του αέρα συνήθως θεωρείται ίσος με τη μονάδα.

Η ανακάλυψη του νόμου της διάθλασης αποδίδεται στον Ολλανδό μαθηματικό και αστρονόμο Willebrord Snellius (1580-1626) ο οποίος κατάφερε να εξάγει την μαθηματική του έκφραση, το 1621, κάνοντας χρήση τριγωνομετρικών μεθόδων. Ο Snell έδειξε ότι

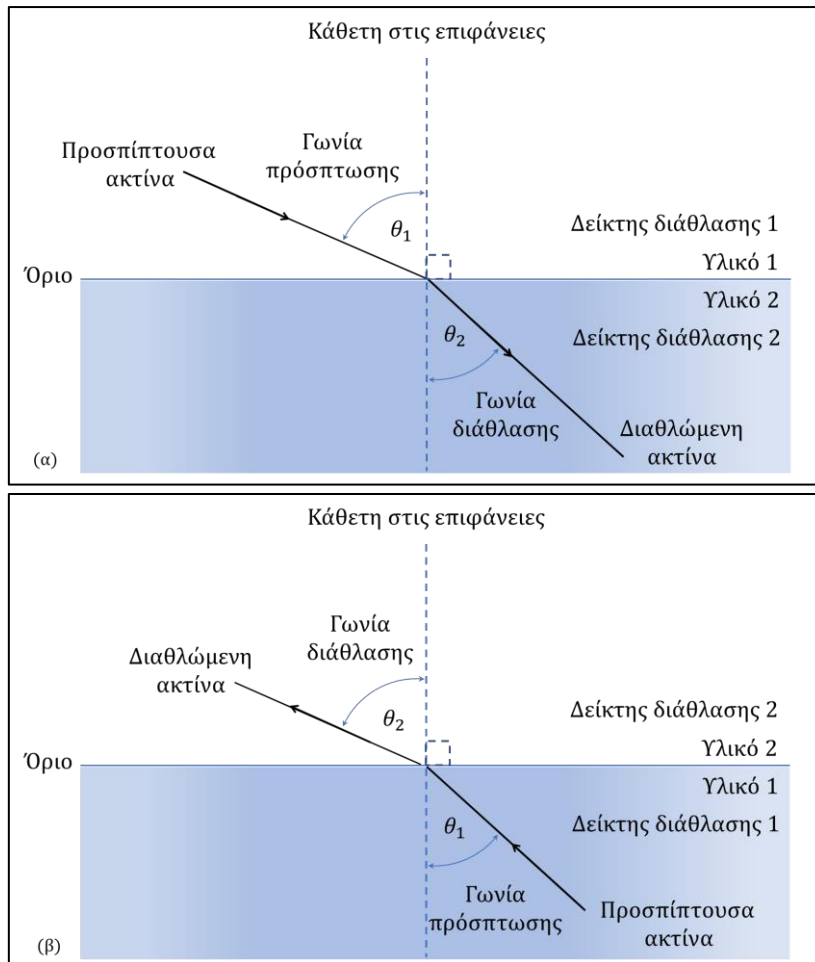
- Η προσπίπτουσα ακτίνα, η διαθλώμενη και η κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο μέσων, στο σημείο πρόσπτωσης της ακτίνας βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο.
- Όταν το φως είναι μονοχρωματικό, ο λόγος του ημίτονου της γωνίας πρόσπτωσης (θ_1) προς το ημίτονο της γωνίας διάθλασης (θ_2) είναι ίσος με τον αντίστροφο λόγο των δεικτών διάθλασης των δύο μέσων και ίσος με τον λόγο των ταχυτήτων διάδοσης σε κάθε μέσο.

Ο νόμος αναφέρει ότι ο λόγος n_2/n_1 των δεικτών διάθλασης είναι αντιστρόφως ανάλογος με το λόγο των ταχυτήτων στα δύο μέσα και αντιστρόφως ανάλογος του λόγου των ημιτόνων των γωνιών πρόσπτωσης θ_1 και διάθλασης θ_2 .

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{u_1}{u_2}$$

Όταν το φως διέρχεται από ένα διαφανές σώμα σε άλλο οπτικά πυκνότερο (όπως όταν περνά από τον αέρα στο γυαλί), τότε η γωνία διάθλασης είναι μικρότερη από τη γωνία πρόσπτωσης (βλέπε Εικόνα 3α). Σε αντίθεση, όταν το φως διέρχεται από ένα οπτικά πυκνότερο σε ένα οπτικά αραιότερο μέσο, για παράδειγμα από το νερό στον αέρα, η διαθλώμενη ακτίνα απομακρύνεται από την κάθετη στην επιφάνεια, δηλαδή η γωνία διάθλασης είναι μεγαλύτερη από τη γωνία πρόσπτωσης (βλέπε Εικόνα 3β).

Σημειώνεται ότι όταν μονοχρωματικό φως διέρχεται από ένα υλικό σε κάποιο άλλο, η συχνότητά του (f), δεν αλλάζει. Αφού η ταχύτητα με την οποία διαδίδεται το φως είναι διαφορετική στα δυο μέσα και η συχνότητα της ακτινοβολίας μένει σταθερή, το μήκος κύματος της ακτινοβολίας πρέπει να είναι διαφορετικό στα δυο μέσα. ($u=\lambda/f$)



Εικόνα 3. (α) Μια φωτεινή δέσμη που αρχικά διαδίδεται στο υλικό (1) με δείκτη διάθλασης n_1 προσπίπτει στην επιφάνεια υλικού (2) με δείκτη διάθλασης n_2 όπου $n_2 > n_1$. Η φωτεινή ακτίνα κάμπτεται προς την κάθετη στις δύο επιφάνειες. (β) Μια φωτεινή δέσμη που αρχικά διαδίδεται στο υλικό (1) με δείκτη διάθλασης n_1 προσπίπτει στην επιφάνεια υλικού (2) με δείκτη διάθλασης n_2 όπου $n_1 > n_2$. Η φωτεινή ακτίνα κάμπτεται απομακρυνόμενη από την κάθετη στις δύο επιφάνειες.

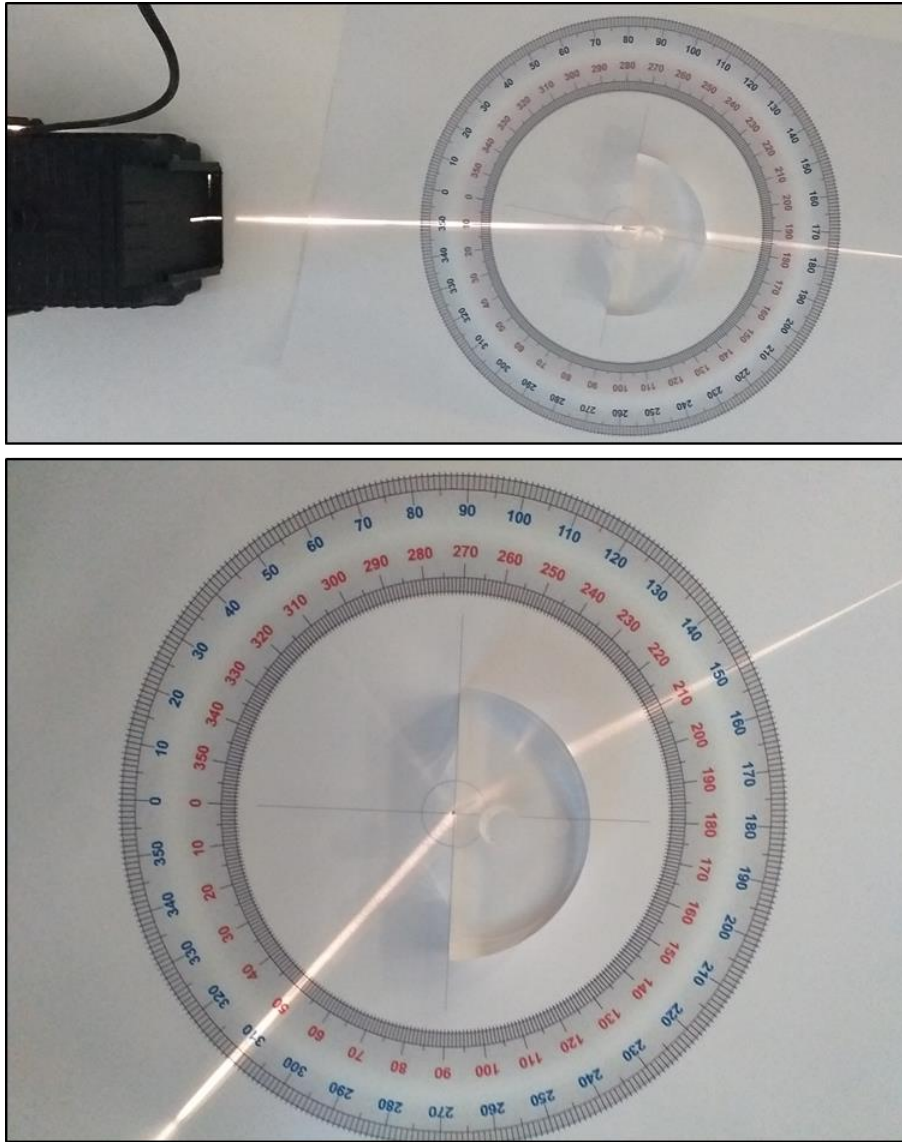
2.1.2.1. Πειραματική διαδικασία

Οι μαθητές καλούνται να επιβεβαιώσουν τον νόμο της ανάκλασης και τον νόμο της διάθλασης (Νόμος του Snell).

Υλικά

- Μία πηγή laser πράσινου χρώματος
- Έναν ημικυκλικό φακό
- Έναν γωνιομετρικό δίσκο (παρέχεται στο τέλος του εγγράφου)

Χρησιμοποιούμε την διάταξη της Εικόνας 3. Ξεκινάμε από γωνία πρόσπτωσης $\theta_1 = 20^\circ$ και μετράμε την γωνία ανάκλασης $\theta_{αν}$ και την γωνία διάθλασης θ_2 . Συνεχίζουμε για γωνίες πρόσπτωσης $30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ$. Καταγράφουμε τα δεδομένα στον Πίνακα 1. Κάνουμε την γραφική παράσταση του $\eta(\theta_1)$ συναρτήσεως του $\eta(\theta_2)$ στο excel. Χρησιμοποιούμε την γραμμή τάσης του excel για να περιγράψουμε τα δεδομένα. Ο δείκτης διάθλασης του αέρα είναι $n_1 \approx 1$.



Εικόνα 3. Πειραματική διάταξη μελέτης του νόμου της διάθλασης. Στο σχήμα διακρίνονται τόσο η γωνία πρόσπτωσης όσο και η γωνία διάθλασης.

Πίνακας 1.

Γωνία πρόσπτωσης (θ_1)	Γωνία διάθλασης (θ_2)	$\eta\mu(\theta_1)$	$\eta\mu(\theta_2)$	n_2

Εξάγουμε τον νόμο του Snell.

$$\frac{\eta\mu(\theta_1)}{\eta\mu(\theta_2)} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

2.2. Ο Newton και το φως

Εκείνος ο οποίος εισήγαγε επίσημα τη θεωρία περί της σωματιδιακής φύσης του φωτός (Optiks 1704) δεν είναι άλλος από τον Sir Isaac Newton (1642-1726). Ο Newton, επηρεασμένος από την ατομική θεωρία των Λεύκιππου και Δημόκριτου, θεώρησε ότι το φως ήταν ένα ρεύμα σωματιδίων (corpuscles) και έτσι εξήγησε τα φαινόμενα της ευθύγραμμης διάδοσης του φωτός και της ανάκλασης. Η θεωρία του Νεύτωνα περί της σωματιδιακής φύσης του φωτός, έγινε ευρέως αποδεκτή, ειδικά επειδή η φήμη του ήταν ήδη σε ιδιαίτερα υψηλό επίπεδο, μετά τη δημοσίευση του έργου του Principia Mathematica (1687). Η μεγάλη φήμη του Newton βοήθησε ώστε η θεωρία του να είναι η επικρατούσα μέχρι και τον 18^ο αιώνα. Παρόλα αυτά σημειώνεται ότι η θεωρία του Newton περί της σωματιδιακής φύσης του φωτός αδυνατούσε να ερμηνεύσει τα φαινόμενα της διάθλασης, της περίθλασης και της συμβολής.

2.2.1. Το κρίσιμο πείραμα του Newton

Ο Newton δεν ήταν ο πρώτος που είδε το ηλιακό φάσμα σε προβολή, ήταν όμως ο πρώτος που στο σχήμα του διέκρινε την αδυναμία των προηγούμενων θεωριών για το φως.

Το 1666 στο Cambridge της Αγγλίας, Newton κατασκεύασε ένα τριγωνικό πρίσμα από γυαλί το οποίο φώτισε με μια ακτίνα ηλιακού φωτός, η οποία περνούσε από μια κυκλική οπή την οποία είχε ανοίξει σε ένα παράθυρο. Παρατηρώντας την εικόνα που δημιουργήθηκε με αυτόν τον τρόπο σε ένα πέτασμα από χαρτί είδε ότι το λευκό φως από το παράθυρο είχε διαχωριστεί σε κόκκινο, πορτοκαλί, κίτρινο, πράσινο, μπλε, λουλακί και ιώδες.

Στη συνέχεια, εκτέλεσε το επονομαζόμενο «κρίσιμο» πείραμα. Με τη χρήση κατάλληλης διάταξης, διάθλασε μια ακτίνα από κάθε χρώμα μέσα από ένα δεύτερο πρίσμα και διαπίστωσε ότι η διαθλαστικότητα είναι μέγεθος σταθερό για το κάθε χρώμα, μεγαλύτερο προς το ιώδες και μικρότερο προς το κόκκινο. Τέλος, ο Newton με τη βοήθεια ενός συγκλίνοντα φακού κατάφερε να συγκεντρώσει όλες τις φωτεινές δέσμες διαφορετικών χρωμάτων και να συνθέσει το λευκό φως. Μέσω αυτού του πειράματος οδηγήθηκε στα κάτωθι συμπεράσματα:

1. Το χρώμα είναι μια ιδιότητα του φωτός και όχι του μέσου διάδοσης.
2. Το φως του Ήλιου (λευκό φως) αποτελείται από όλα τα χρώματα (κόκκινο, πορτοκαλί, το κίτρινο, το πράσινο, το μπλε, το λουλακί (μπλε-μωβ) και το ιώδες).
3. Όταν το φως του Ήλιου περνά μέσα από ένα πρίσμα διαχωρίζεται στα χρώματα του ουράνιου τόξου.
4. Το ιώδες διαθλάται περισσότερο από το κόκκινο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ιώδες να αποκλίνει από την ευθύγραμμη πορεία του μεγαλύτερη γωνία από ότι το κόκκινο χρώμα.
5. Όταν το κόκκινο χρώμα περνά μέσα από το πρίσμα παραμένει κόκκινο. Το ίδιο ισχύει για το πράσινο και το μπλε.
6. Η σύνθεση των χρωμάτων του ουράνιου τόξου δίνει λευκό φως.

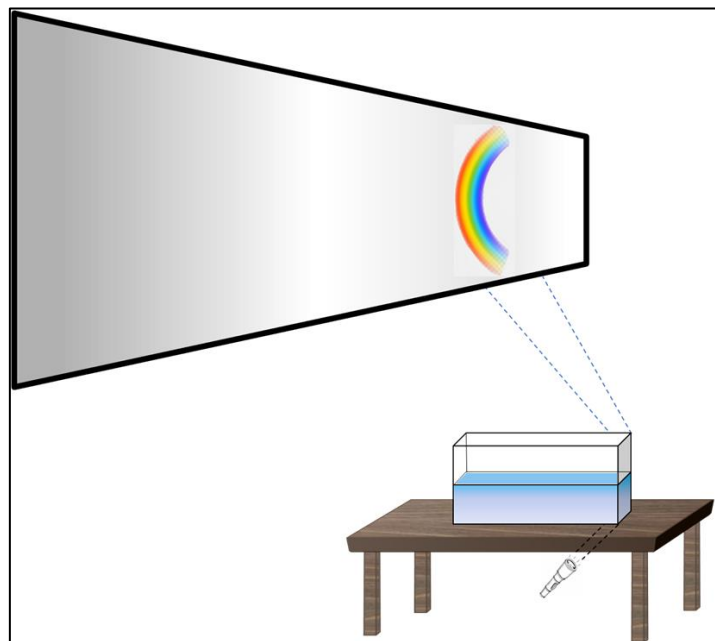
2.2.1.1. Πειραματική διαδικασία

Το εν λόγω πείραμα είναι επίδειξης και θα πραγματοποιηθεί από τον καθηγητή/τρια. Επειδή θέλουμε η επίδειξη του φαινομένου να γίνει σε μεγάλη κλίμακα δεν θα χρησιμοποιήσουμε λεπτή δέσμη φωτός και πρίσμα. Αντί του πρίσματος θα χρησιμοποιήσουμε ένα διάφανο δοχείο με νερό, αντί της λεπτής δέσμης θα χρησιμοποιήσουμε έναν δυνατό φακό ενώ για πέτασμα θα χρησιμοποιήσουμε έναν λευκό τοίχο.

Υλικά

- Ένα διάφανο δοχείο από plexiglass διαστάσεων 25 cm μήκος, 10 cm πλάτος και 10 cm ύψος.
- Έναν δυνατό φακό led
- Μια πηγή laser κόκκινου χρώματος
- Μία πηγή laser πράσινου χρώματος
- Μια πηγή laser μπλε χρώματος
- 3 φακούς
- 1 κόκκινο φίλτρο
- 1 πράσινο φίλτρο
- 1 μπλε φίλτρο

1^ο μέρος: Γεμίζουμε το δοχείο με νερό μέχρι τη μέση και το τοποθετούμε πάνω σε ένα τραπέζι το οποίο με τη σειρά του είναι τοποθετημένο κάθετα στον τοίχο και σε απόσταση περίπου 2 m από αυτόν (βλέπε Εικόνα 4). Στρέφουμε τον φακό προς το δοχείο έτσι ώστε η φωτεινή δέσμη να περνά μέσα από το νερό και παρατηρούμε το φάσμα του λευκού φωτός στον τοίχο.



Εικόνα 4. Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης ανάλυσης του λευκού φωτός στα χρώματα του ουράνιου τόξου.

2ο μέρος: Συνεχίζοντας, χρησιμοποιούμε τις πηγές laser (κόκκινη, πράσινη, μπλε) για να δείξουμε ότι όταν το κόκκινο φως περνά μέσα από το νερό παραμένει κόκκινο, ενώ το ίδιο συμβαίνει με το πράσινο και το μπλε. Συνεπώς, τα χρώματα κόκκινο, πράσινο και μπλε είναι απλά.

3ο μέρος: Για την επίδειξη αυτού του πειράματος θα χρειαστούμε 3 φακούς και 3 φίλτρα (1 κόκκινο, 1 πράσινο, 1 μπλε). Βάζουμε από ένα φίλτρο μπροστά από κάθε φακό και στρέφουμε τους φακούς στην ίδια περιοχή ενός λευκού πετάσματος προς σχηματισμό λευκού φωτός.

Συνδυάζοντας τους φακούς ανά δύο μπορούμε να δείξουμε πως σχηματίζονται τα υπόλοιπα χρώματα που παρατηρούμε στο ουράνιο τόξο.

2.3. Ο Grimaldi και το φαινόμενο της περίθλασης

Το 1660 ο Francesco Grimaldi (1618-1663) έκανε την πρώτη παρατήρηση του φαινομένου που ο ίδιος στη συνέχεια αποκάλεσε περίθλαση. Μέσω πειράματος έδειξε ότι όταν το φως περάσει μέσα από μια οπή τότε δεν ακολουθεί ευθύγραμμη πορεία όπως θα ήταν αναμενόμενο αν αποτελούνταν από σωματίδια. Σε αντίθεση, ο Grimaldi παρατήρησε ότι όταν η δέσμη φωτός εξέρχεται από την λεπτή οπή παίρνει τη μορφή ενός κώνου που είναι γνωστός ως κώνος φωτός.

2.3.1. Το φαινόμενο της περίθλασης

Η περίθλαση είναι ένα φαινόμενο το οποίο λαμβάνει χώρα όταν κύματα, κατά τη διάδοσή τους συναντούν ένα εμπόδιο, μια οπή ή μία σχισμή. Είναι μία από τις περιπτώσεις στις οποίες το φως εκτρέπεται από την ευθεία πορεία του. Όταν το φως διέρχεται μέσα από μία λεπτή σχισμή ή οπή δεν εμφανίζεται ένα απλό φωτεινό αποτύπωμα σε μία οθόνη τοποθετημένη πίσω από την σχισμή που αντιστοιχεί στην εικόνα της οπής ή της σχισμής αλλά μία εικόνα που περιλαμβάνει φωτεινές και σκοτεινές περιοχές σε μία μεγάλη περιοχή γύρω από την θέση που θα έπρεπε να εμφανίζεται το φωτεινό αποτύπωμα.

2.3.1.1. Πειραματική διαδικασία

Το εν λόγω πείραμα είναι επίδειξης και θα πραγματοποιηθεί από τον καθηγητή/τρια.

Υλικά

Ένα κομμάτι χαρτόνι διαστάσεων 15cm x 15cm

Ένα κομμάτι ξύλου

Μια πηγή laser πράσινου χρώματος

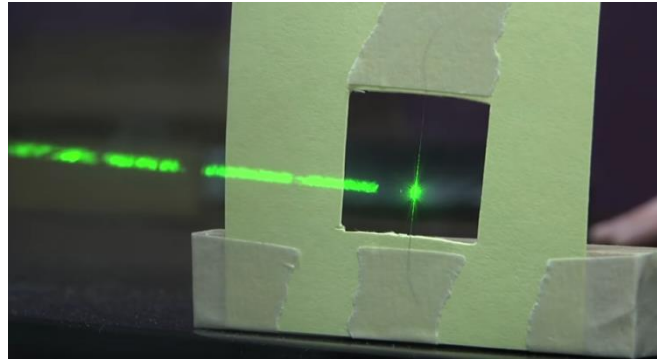
Κολλητική ταινία

Λεπτή τρίχα

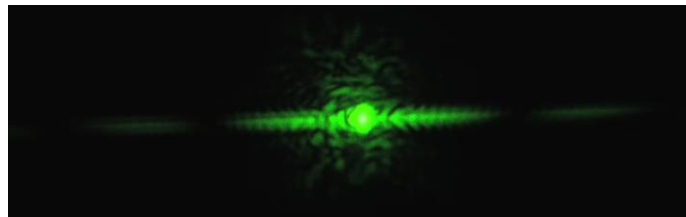
Με τη βοήθεια μιας λεπίδας κόβουμε ένα τετράγωνο άνοιγμα στην επιφάνεια του χαρτονιού, το οποίο να έχει διαστάσεις 5cm x 5cm. Στη μέση του τετράγωνου ανοίγματος στερεώνουμε την τρίχα με τη βοήθεια της κολλητικής ταινίας. Στερεώνουμε στη συνέχεια το τετράγωνο χαρτόνι στην ξύλινη επιφάνεια (βλέπε Εικόνα 5).

Στερεώνουμε την πηγή laser σε απόσταση 3-4 m από έναν λευκό τοίχο. Σε απόσταση ~20 cm από την πηγή laser τοποθετούμε την διάταξη που κατασκευάσαμε ανωτέρω. Κλείνουμε τα φώτα του δωματίου και θέτουμε την πηγή laser σε λειτουργία έτσι ώστε η φωτεινή δέσμη να προσπίπτει στην λεπτή τρίχα (βλέπε Εικόνα 5).

Παρατηρούμε στην επιφάνεια του τοίχου το φωτεινό αποτύπωμα (βλέπε Εικόνα 6) το οποίο είναι αποτέλεσμα της περίθλασης του φωτός από λεπτό εμπόδιο.

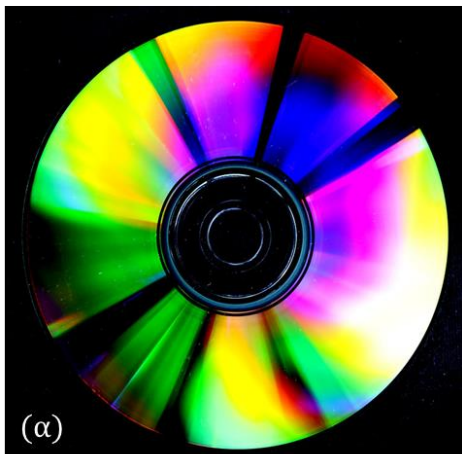


Εικόνα 5. Πειραματική διάταξη επίδειξης του φαινομένου της περίθλασης του φωτός από λεπτό εμπόδιο.



Εικόνα 6. Το φωτεινό αποτύπωμα που προκύπτει από την περίθλαση του φωτός από λεπτό εμπόδιο.

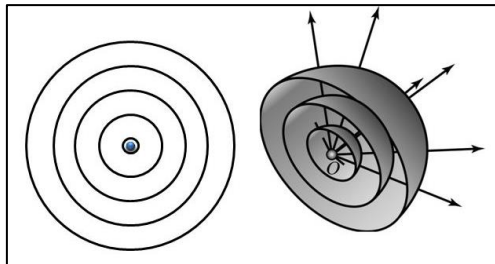
Παρατήρηση: Ο καθηγητής/τρια μπορεί να αναφέρει παραδείγματα περίθλασης τα οποία συναντάμε στην καθημερινότητα όπως είναι τα χρώματα του φάσματος του λευκού φωτός τα οποία εμφανίζονται στην πίσω επιφάνεια ενός CD (Εικόνα 7α) ή οι ακτίνες που περιβάλλουν τα άστρα σε φωτογραφίες που έχουν ληφθεί από οπτικά τηλεσκόπια (Εικόνα 7β).



Εικόνα 7. (α) Στην επιφάνεια ενός CD λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της περίθλασης. Η επιφάνεια προκαλεί την εκτροπή διαφορετικών μηκών κύματος σε διαφορετικές γωνίες με αποτέλεσμα τη δημιουργία του φάσματος του ορατού φωτός. (β) Στις φωτογραφίες που βλέπουμε από το διάστημα, τα περισσότερα αστέρια εμφανίζονται σαν να έχουν σταυρούς ή ακτίνες γύρω τους. Τόσο οι σταυροί όσο και οι ακτίνες προκαλούνται τεχνητά εξαιτίας της περίθλασης του φωτός στους καθρέφτες στο εσωτερικό των τηλεσκοπίων.

2.4. Η κυματική φύση του φωτός σύμφωνα με τον Huygens

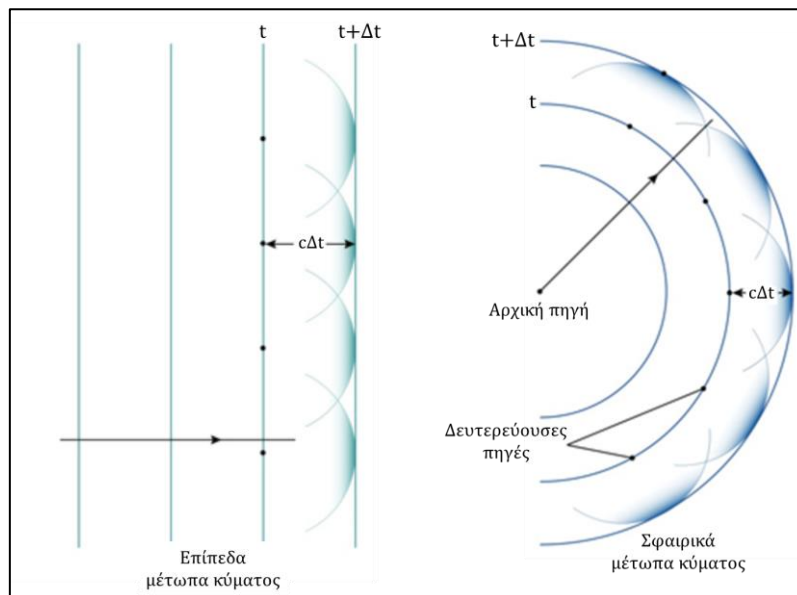
Την ίδια περίοδο που ο Newton διατύπωσε την θεωρία του περί της σωματιδιακής φύσης του φωτός, ένας άλλος φυσικός, ο Δανός Christian Huygens (1629–1695) υποστήριξε ότι το φως ήταν διαμήκη κύματα τα οποία ταξίδευαν στον αιθέρα. Για το λόγο αυτό το 1678 βρήκε έναν τρόπο με τον οποίο μπορούσε να εξηγήσει την διάδοση των φωτεινών κυμάτων. Ο Huygens πρότεινε ότι οι κορυφές των φωτεινών κυμάτων σχηματίζουν επιφάνειες που μοιάζουν με τους φλοιούς του κρεμμυδιού (Εικόνα 8). Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον Huygens, τα κύματα φωτός σε ένα ομοιογενές μέσο είναι σφαιρικά και διαχέονται καθώς διαδίδονται.



Εικόνα 8. Σφαιρικά κύματα και ο τρόπος διάδοσής τους σύμφωνα με την θεωρία του Huygens

2.4.1. Η αρχή του Huygens

Το 1678 ο Huygens διατύπωσε την ομώνυμη αρχή σύμφωνα με την οποία: *Κάθε σημείο ενός μετώπου κύματος, μπορεί να θεωρηθεί σαν μια δευτερεύουσα πηγή σφαιρικού κύματος. Η νέα θέση του μετώπου κύματος θα είναι η κοινή περιβάλλουσα, όλων αυτών των σφαιρικών κυμάτων* (Εικόνα 9).



Εικόνα 9. Επίπεδα και σφαιρικά μέτωπα κύματος και ο τρόπος διάδοσής τους σύμφωνα με την αρχή του Huygens.

2.4.1.1. Πειραματική διαδικασία

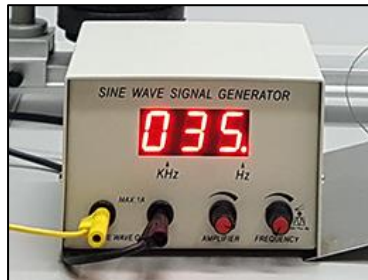
Τα πειράματα αυτής της παραγράφου είναι πειράματα επίδειξης που θα πραγματοποιηθούν από τον καθηγητή/τρια. Σκοπός των πειραμάτων είναι η ανάδειξη της έννοιας του σφαιρικού κύματος, του μετώπου κύματος και των δευτερογενών πηγών κύματος.

Υλικά

- Ένα πλαστικό διάφανο δοχείο διαστάσεων: βάθος ~10 cm, μήκος ~30 cm και πλάτος ~20 cm



- Γεννήτρια συχνοτήτων με ρύθμιση έντασης και ρύθμιση συχνότητας



- Ηλεκτρομηχανικός ταλαντωτής (vibration generator) (1Hz έως 400Hz step 1Hz & 0.01kHz έως 4.00kHz step 0.01kHz)



- 2 καλώδια μπανάνες 4mm



- Μία μεταλλική πλάκα (πλάκα Chladni) που να προσαρμόζεται στον ηλεκτρομηχανικό ταλαντωτή



- Τρία μεταλλικά ελάσματα όπου στο άκρο καθενός έχει προσαρτηθεί μια σφαίρα από πλαστελίνη (για την παραγωγή σφαιρικών κυμάτων)



- Μια ξύλινη ακίδα (ξύλινο καλαμάκι) για την παραγωγή επίπεδων κυμάτων
- Ένα μεταλλικό κλιπ



- Πιστόλι θερμόκολλας
- Δύο ξύλινους τάκους μήκους ~30 cm, πλάτους ~5 cm και ύψους ~10 cm.

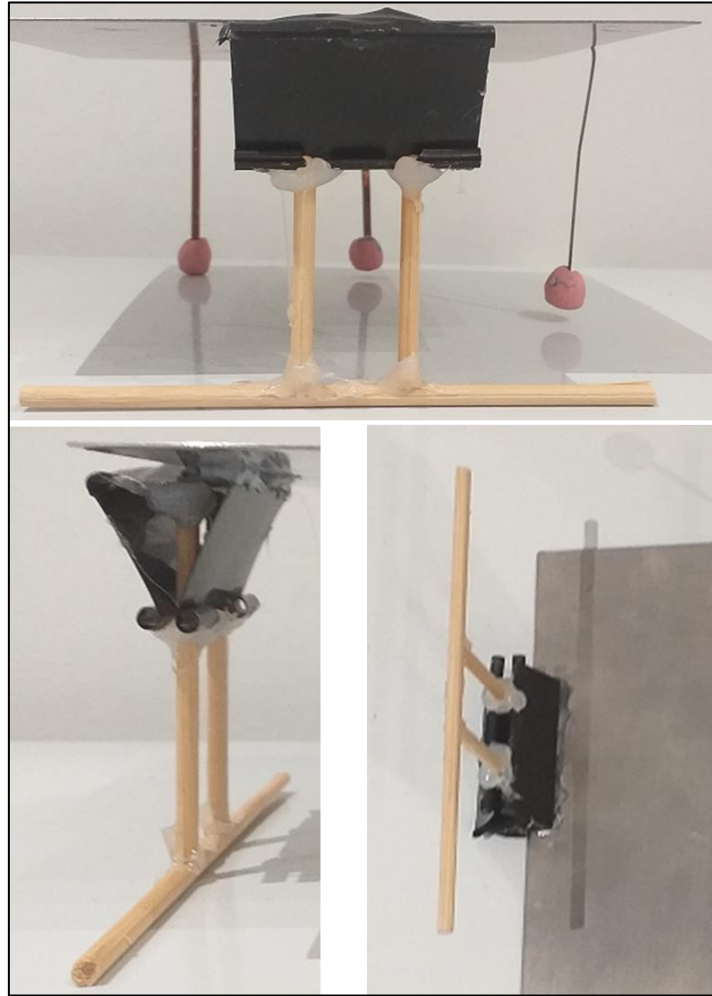


- Έναν καθρέφτη μήκους ~20 cm και πλάτους ~10 cm.
- Πέτασμα με μονή σχισμή εύρους ~ 1-2 cm
- Πέτασμα με διπλή σχισμή με εύρος σχισμής ~ 1 cm
- Μία web camera

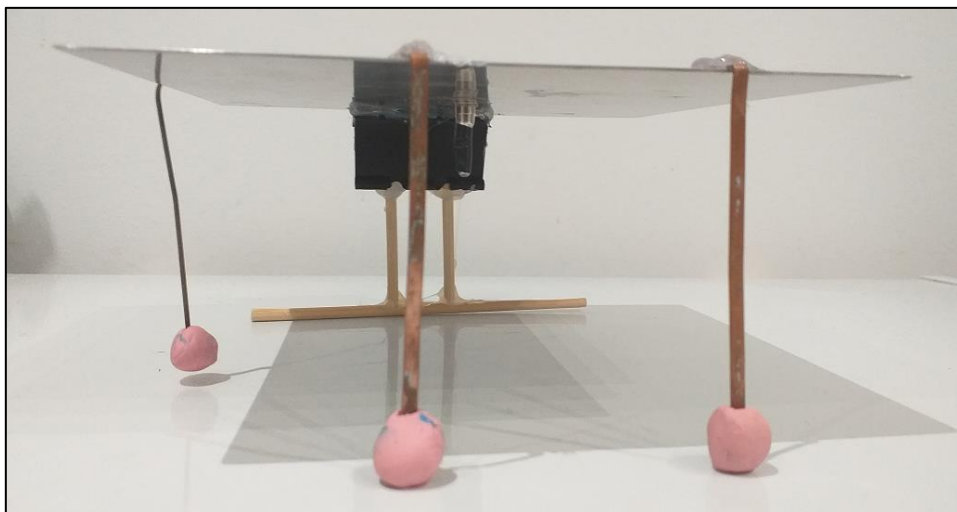
Προετοιμασία της πειραματικής διάταξης

- Χρησιμοποιώντας το μεταλλικό κλιπ, το ξύλινο καλαμάκι και το πιστόλι θερμόκολλας κατασκευάζουμε το εξάρτημα παραγωγής επίπεδων κυμάτων όπως φαίνεται στην Εικόνα 10.

- ii. Χρησιμοποιώντας το πιστόλι θερμόκολλας προσαρτούμε τα τρία μεταλλικά ελάσματα με τις σφαίρες πλαστελίνης και το εξάρτημα παραγωγής επίπεδων κυμάτων, στην μεταλλική πλάκα, σύμφωνα με την Εικόνα 11.

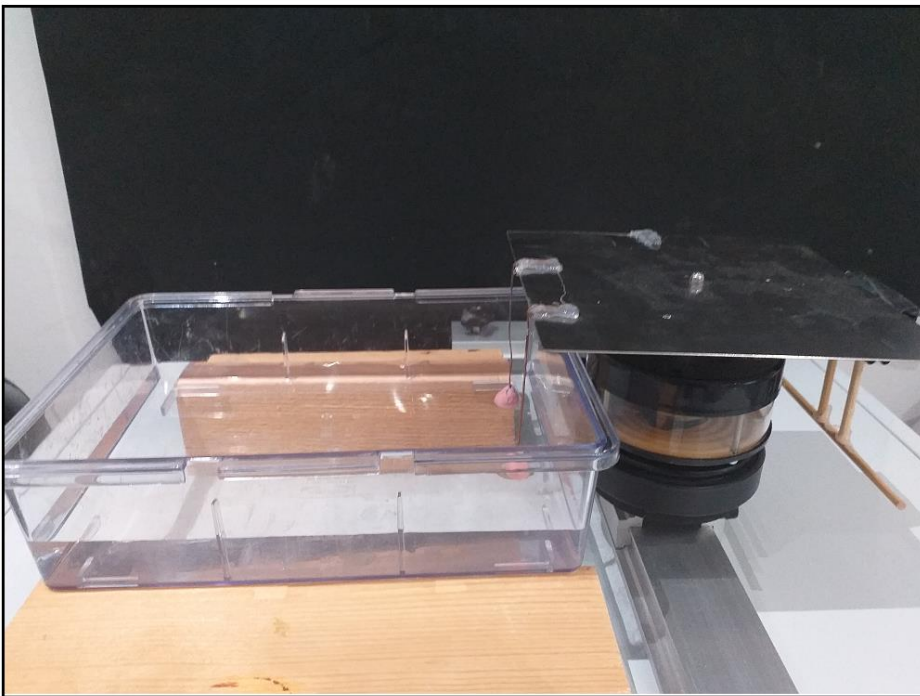


Εικόνα 10. Εξάρτημα παραγωγής επίπεδων κυμάτων το οποίο θα προσαρτηθεί στην μεταλλική πλάκα.



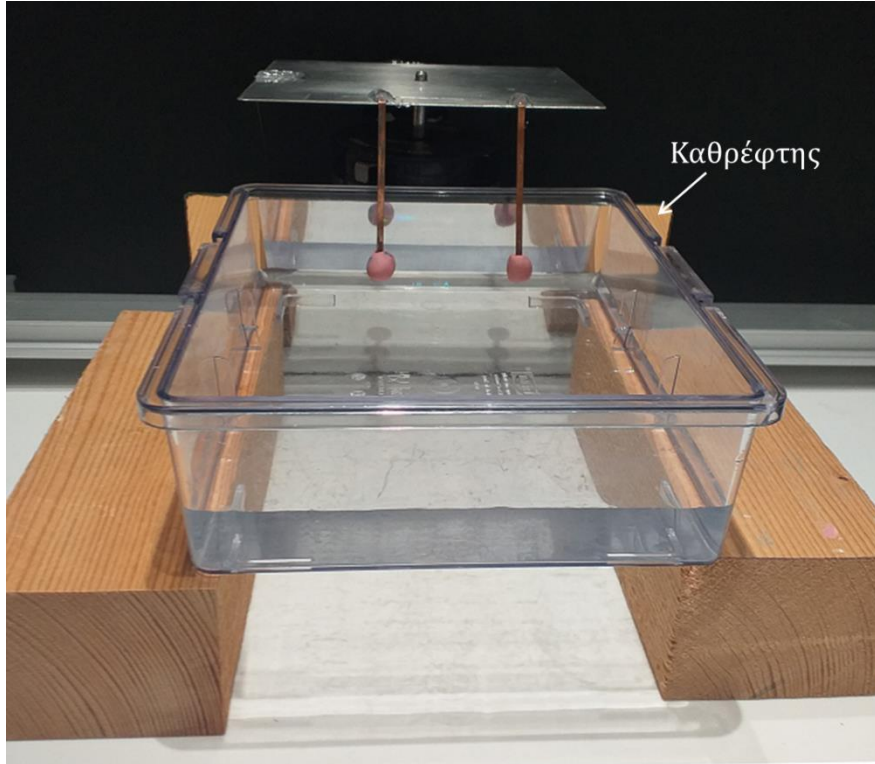
Εικόνα 11. Η μεταλλική πλάκα η οποία θα προσαρτηθεί στον ηλεκτρομηχανικό ταλαντωτή για την παραγωγή επίπεδων και σφαιρικών κυμάτων.

- iii. Τοποθετούμε το διάφανο πλαστικό δοχείο πάνω στους δύο ξύλινους τάκους.
- iv. Προσαρμόζουμε την μεταλλική επιφάνεια πάνω στον ηλεκτρομηχανικό ταλαντωτή και τοποθετούμε την διάταξη σύμφωνα με την Εικόνα 12.
- v. Γεμίζουμε το δοχείο με νερό μέχρις ότου οι σφαίρες πλαστελίνης και το εξάρτημα παραγωγής επίπεδων κυμάτων να εφάπτονται στην επιφάνεια του νερού (βλέπε Εικόνα 12).

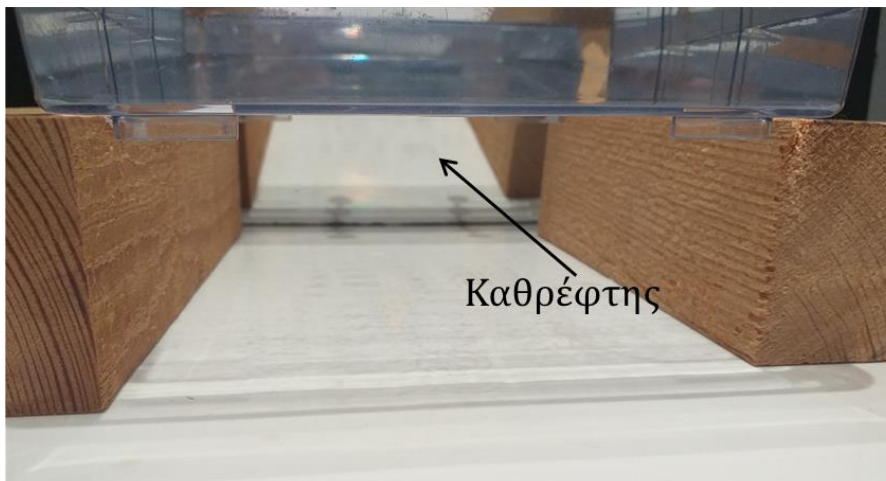


Εικόνα 12. Η διάταξη παραγωγής σφαιρικών και επίπεδων κυμάτων στην επιφάνεια του νερού.

- vi. Τοποθετούμε τον καθρέπτη μεταξύ του πλαστικού δοχείου και του ηλεκτρομηχανικού ταλαντωτή (βλέπε Εικόνα 13).
- vii. Τοποθετούμε την web camera κάτω από το διάφανο πλαστικό κουτί και μεταξύ των δύο ξύλινων τάκων έτσι ώστε η camera να «βλέπει» τον καθρέπτη που βρίσκεται μεταξύ του ταλαντωτή και του πλαστικού δοχείου (βλέπε Εικόνα 14).



Εικόνα 13. Μεταξύ του ηλεκτρομηχανικού ταλαντωτή και της πλαστικής δεξαμενής είναι τοποθετημένος ο καθρέπτης.



Εικόνα 14. Φωτογραφία που έχει ληφθεί με την web camera η οποία βρίσκεται κάτω από το πλαστικό δοχείο και μεταξύ των ξύλινων τάκων. Στο βάθος φαίνεται ο καθρέπτης και το είδωλο που δημιουργείται.

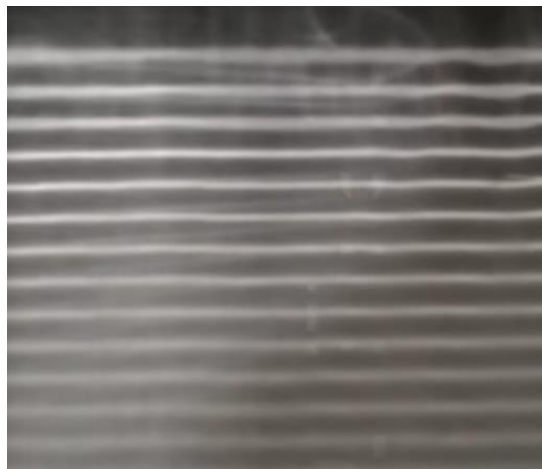
1^ο μέρος

Στο μέρος αυτό οι μαθητές/τριες θα παρατηρήσουν τη δημιουργία σφαιρικών και επίπεδων κυμάτων με σκοπό να διακρίνουν τα μέτωπα κύματος και τον τρόπο διάδοσής τους.

- i. Περιστρέφουμε την μεταλλική επιφάνεια, που είναι προσαρμοσμένη στον ταλαντωτή ώστε το μονό έλασμα με την σφαίρα πλαστελίνης να εφάπτεται στην επιφάνεια του νερού.
- ii. Στην γεννήτρια συχνοτήτων θέτουμε την συχνότητα μεταξύ 25-35 Hz. Η ταλάντωση της σφαίρας πλαστελίνης δημιουργεί στην επιφάνεια του νερού σφαιρικά κύματα η διάδοση των οποίων μπορεί να παρατηρηθεί μέσω της webcam (Εικόνα 15).
- iii. Περιστρέφουμε την μεταλλική επιφάνεια ώστε το εξάρτημα παραγωγής επίπεδων κυμάτων να εφάπτεται στην επιφάνεια του νερού.
- iv. Στην γεννήτρια συχνοτήτων θέτουμε την συχνότητα μεταξύ 25-35 Hz. Η ταλάντωση του μηχανισμού δημιουργεί στην επιφάνεια του νερού επίπεδα κύματα, η διάδοση των οποίων μπορεί να παρατηρηθεί μέσω της webcam (Εικόνα 16).



Εικόνα 15. Σφαιρικά κύματα τα οποία δημιουργούνται στην επιφάνεια του νερού από την ταλάντωση του μονού ελάσματος.

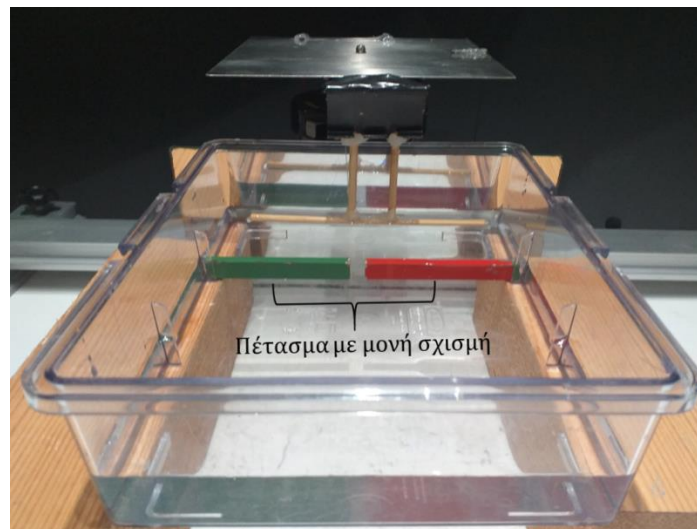


Εικόνα 16. Επίπεδα κύματα τα οποία δημιουργούνται στην επιφάνεια του νερού από την ταλάντωση της επίπεδης επιφάνειας.

2ο μέρος

Στο πείραμα αυτό οι μαθητές/τριες θα παρατηρήσουν την περίθλαση επίπεδων κυμάτων από μονή σχισμή. Μέσω του πειράματος αναδεικνύεται το φαινόμενο της περίθλασης των επίπεδων κυμάτων από την μονή σχισμή η οποία δρα ως δευτερεύουσα πηγή παραγωγής σφαιρικών κυμάτων.

- i. Τοποθετούμε στο πλαστικό δοχείο το πέτασμα με την μονή σχισμή, σε απόσταση μερικών εκατοστών από το εξάρτημα παραγωγής επίπεδων κυμάτων. Προσέχουμε ώστε το πέτασμα να μην είναι πλήρως βυθισμένο στο νερό αλλά να φθάνει τουλάχιστον μέχρι την επιφάνεια του νερού (βλέπε Εικόνα 15).
- ii. Θέτουμε την συχνότητα στην γεννήτρια μεταξύ 25-35 Hz.
- iii. Παρατηρούμε μέσω της webcam το φαινόμενο της περίθλασης και της δημιουργίας των σφαιρικών κυμάτων (Εικόνα 18).



Εικόνα 17. Πειραματική διάταξη στην οποία έχει προσαρτηθεί το πέτασμα με την μονή σχισμή.



Εικόνα 18. Παραγωγή σφαιρικών κυμάτων από την περίθλαση επίπεδων κυμάτων σε μονή σχισμή.

2.5. Το πείραμα της διπλής οπής του Young

Μέχρι και τις αρχές του 19^{ου} αιώνα η κοινώς αποδεκτή θεωρία περί της φύσης του φωτός ήταν η σωματιδιακή. Αυτό οφείλονταν κυρίως στο μεγάλο επιστημονικό κύρος του Νεύτωνα. Όμως το 1802 ο Thomas Young (1773-1829) πραγματοποίησε το πείραμα της διπλής σχισμής τα αποτελέσματα του οποίου άρχισαν να κλονίζουν συθέμελα την θεωρία του Νεύτωνα.

Το πείραμα του Young συνίστατο στην διάδοση μιας λεπτής δέσμης φωτός μέσω δύο λεπτών σχισμών σε πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους. Αυτό που παρατήρησε ο Young ήταν ότι το αποτύπωμα που άφηνε το φως σε ένα πέτασμα πίσω από την διπλή σχισμή ήταν ένα μοτίβο από φωτεινές και σκοτεινές περιοχές παρόμοιο με αυτό που αφήνουν τα μηχανικά κύματα όταν συμβάλουν (βλέπε Εικόνες 20, 21). Ο Young προτού πραγματοποιήσει το πείραμα της διπλής σχισμής με φως είχε μελετήσει το φαινόμενο της συμβολής των ηχητικών κυμάτων και δημοσίευσε τα αποτελέσματά του στην Βασιλική Εταιρία (Royal Society) το 1799.

Προκειμένου οι μαθητές/τριες να κατανοήσουν το αποτέλεσμα του πειράματος της διπλής σχισμής του Young για το φως, πριν την εκτέλεσή του θα πραγματοποιήσουμε το πείραμα της διπλής σχισμής με μηχανικά κύματα τα οποία αναπτύσσονται στην επιφάνεια του νερού, προκειμένου να μελετηθεί το φαινόμενο της συμβολής.

Τα εν λόγω πειράματα είναι επίδειξης και θα πραγματοποιηθούν από τον καθηγητή/τρια. Σκοπός των πειραμάτων είναι ανάδειξη των φαινομένων της περίθλασης και της συμβολής μηχανικών κυμάτων, από διπλή σχισμή, στην επιφάνεια του νερού.

2.5.1. Πειραματική διαδικασία

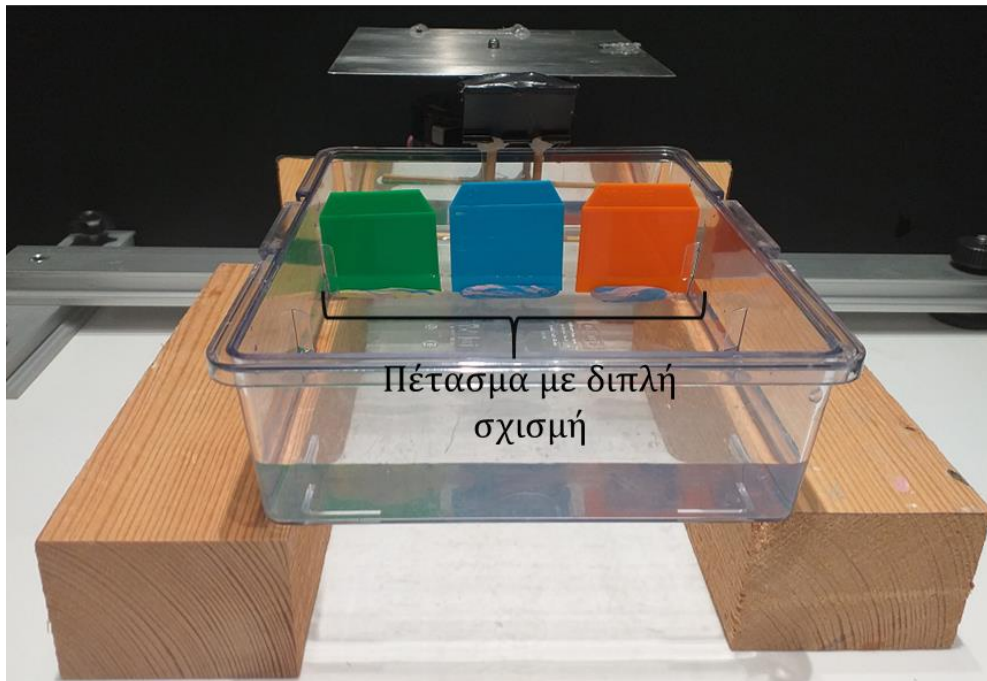
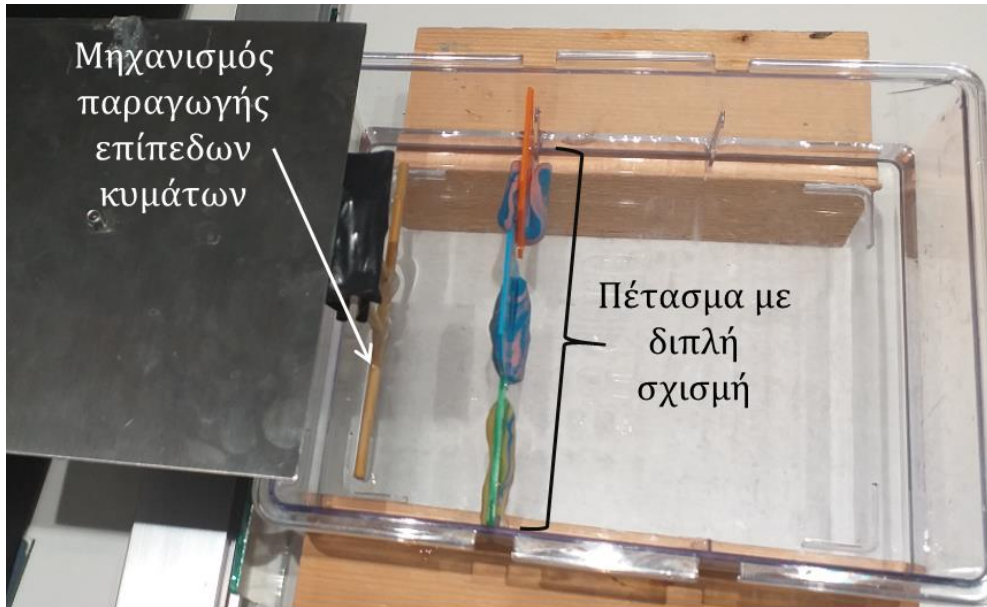
Στο πρώτο μέρος θα κάνουμε χρήση της διάταξης παραγωγής κυμάτων στο νερό μέσω της οποίας θα παρατηρηθεί το φαινόμενο της συμβολής των μηχανικών κυμάτων. Στο δεύτερο μέρος θα πραγματοποιηθεί το πείραμα της διπλής σχισμής κάνοντας χρήση μιας πηγής laser και θα συγκριθούν τα αποτελέσματα των δύο πειραμάτων. Και τα δύο πειράματα είναι πειράματα επίδειξης και θα πραγματοποιηθούν από τον καθηγητή/τρια.

2.5.1.1. Περίθλαση και συμβολή μηχανικών κυμάτων

Προκειμένου να παρατηρήσουμε τα φαινόμενα της περίθλασης και της συμβολής θα χρησιμοποιήσουμε τον μηχανισμό παραγωγής επίπεδων κυμάτων και το πέτασμα με την διπλή σχισμή όπως φαίνεται στην Εικόνα 19.

Υλικά

- Διάταξη παραγωγής κυμάτων

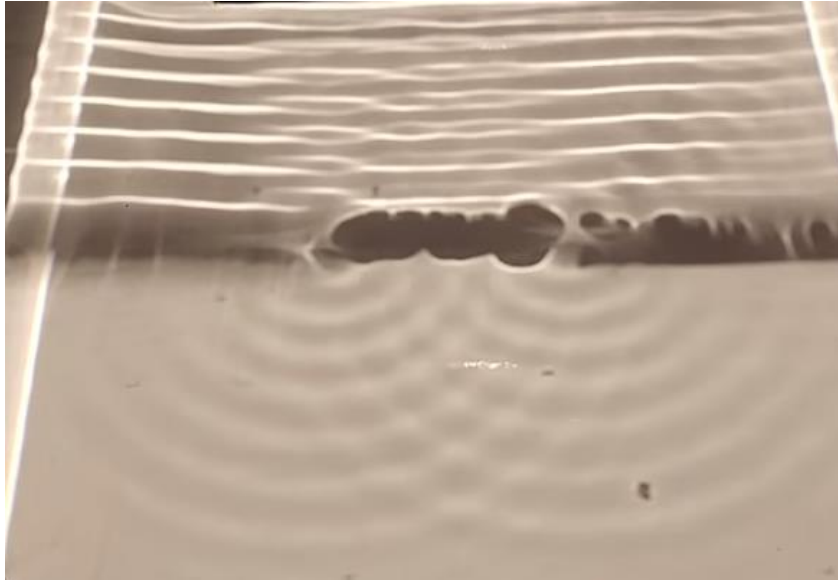


Εικόνα 19. Πειραματική διάταξη στην οποία έχει προσαρτηθεί το πέτασμα με την διπλή σχισμή για την επίδειξη της περίθλασης και συμβολής μηχανικών κυμάτων.

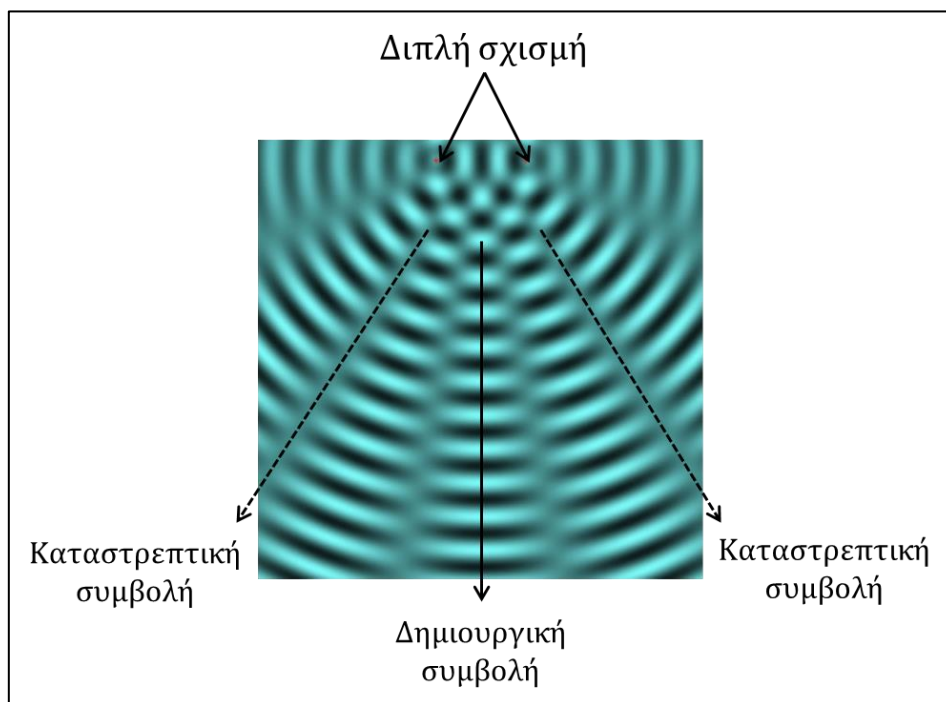
Σε αυτό το μέρος θα πραγματοποιηθεί το πείραμα της διπλής σχισμής στο οποίο οι μαθητές/τριες θα παρατηρήσουν τα φαινόμενα της περίθλασης και της συμβολής μηχανικών κυμάτων.

- i. Τοποθετούμε στο πλαστικό δοχείο το πέτασμα με την διπλή σχισμή, σε απόσταση μερικών εκατοστών από το εξάρτημα παραγωγής επίπεδων κυμάτων. Προσέχουμε ώστε το πέτασμα να μην είναι πλήρως βυθισμένο στο νερό αλλά να φθάνει τουλάχιστον μέχρι την επιφάνεια του νερού (βλέπε Εικόνα 19).
- ii. Θέτουμε την συχνότητα στην γεννήτρια μεταξύ 25-35 Hz.

- iii. Μέσω της webcam οι μαθητές/τριες θα παρατηρήσουν α) το φαινόμενο της περίθλασης επίπεδων κυμάτων από δύο σχισμές (Εικόνες 20) και β) το φαινόμενο της συμβολής των σφαιρικών κυμάτων που πηγάζουν από τις δύο σχισμές (Εικόνες 20, 21).



Εικόνα 20. Το φαινόμενο της περίθλασης επίπεδων κυμάτων από διπλή σχισμή και το φαινόμενο της συμβολής σφαιρικών κυμάτων.



Εικόνα 21. Σχηματική αναπαράσταση του φαινομένου της συμβολής σφαιρικών κυμάτων. Στην εικόνα διακρίνονται τόσο η καταστρεπτική όσο και η δημιουργική συμβολή.

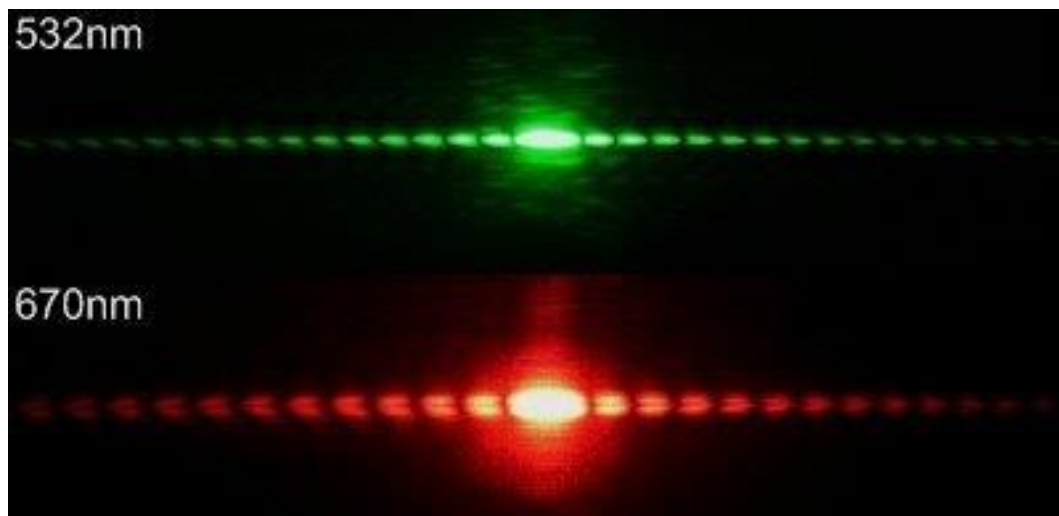
2.5.1.2. Περίθλαση και συμβολή φωτεινών κυμάτων

Υλικά

- Μια πηγή laser πράσινου χρώματος
- Ένα διάφραγμα με διπλή σχισμή



Στερεώνουμε το διάφραγμα με την διπλή σχισμή σε απόσταση μερικών μέτρων από ένα λευκό πέτασμα. Κατευθύνουμε την πηγή laser έτσι ώστε η φωτεινή δέσμη να προσπίπτει στην διπλή σχισμή και παρατηρούμε στο πέτασμα το μοτίβο περίθλασης και συμβολής το οποίο αποτελείται από φωτεινούς και σκοτεινούς κροσσούς (Εικόνα 22)



Εικόνα 22. Μοτίβο συμβολής από πράσινο και κόκκινο laser. Στην εικόνα διακρίνονται οι φωτεινοί και σκοτεινοί κροσσοί.

2.6. Η φωτεινή κηλίδα του Fresnel (ή Poisson ή Arago)

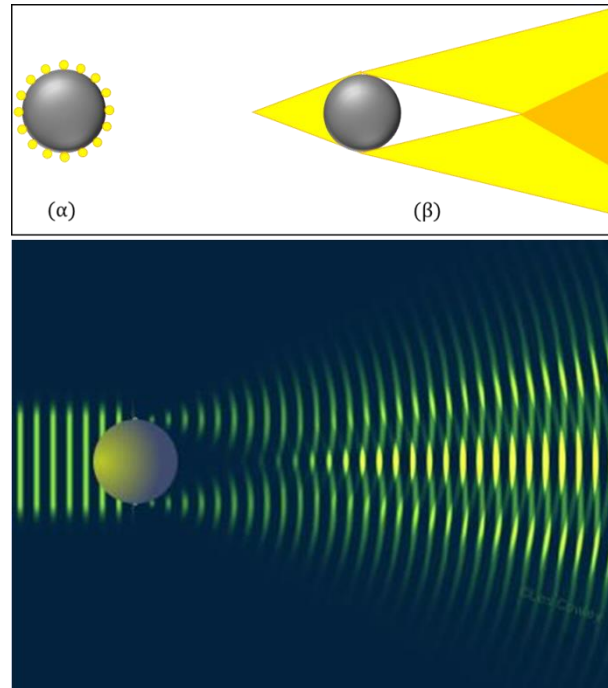
Το 1818 η Γαλλική Ακαδημία Επιστημών ανακοίνωσε την διεξαγωγή διαγωνισμού ζητώντας από τους διαγωνιζόμενους να προτείνουν τις ερμηνείες τους για την φύση του φωτός. Σημειώνεται πως εκείνη την χρονική περίοδο, παρά τα πειράματα των Grimaldi και Young και την θεωρία του Huygens, η επικρατούσα άποψη για την φύση του φωτός ήταν αυτή του Νεύτωνα. Ο τριαντάχρονος φυσικός Augustin-Jean Fresnel (1788-1827) συμμετείχε στο διαγωνισμό προτείνοντας μια νέα θεωρία η οποία υποστήριζε την κυματική φύση του φωτός.

Ο μαθηματικός, φυσικός και μηχανικός Siméon Denis Poisson (1781-1840), ο οποίος ήταν μέλος της επιτροπής, και υποστηρικτής της θεωρίας του Νεύτωνα, μελέτησε τη θεωρία του Fresnel και προσπάθησε να την απορρίψει. Μελετώντας την θεωρία του Fresnel, ο Poisson διαπίστωσε πως μια συνέπεια της θεωρίας του πρώτου ήταν η εμφάνιση μιας φωτεινής κηλίδας στο κέντρο της σκιάς που δημιουργείται πίσω από ένα στρογγυλό εμπόδιο το οποίο φωτίζεται από μια φωτεινή πηγή. Ο Poisson πραγματοποίησε το πείραμα και μην παρατηρώντας αυτή την φωτεινή κηλίδα κατέληξε πως η θεωρία του Fresnel ήταν λανθασμένη.

Παρόλα αυτά ο επικεφαλής της επιτροπής Dominique-François-Jean Arago αποφάσισε να εκτελέσει το πείραμα ο ίδιος χρησιμοποιώντας μια διάταξη μεγαλύτερης ακρίβειας. Εκτελώντας το πείραμα, ο Arago κατάφερε να παρατηρήσει την φωτεινή κηλίδα επιβεβαιώνοντας έτσι την θεωρία του Fresnel. Το αποτέλεσμα του πειράματος έπεισε τα μέλη της κριτικής επιτροπής τα οποία οδηγήθηκαν στην απόφαση πως το φως έχει κυματική φύση. Έκτοτε η διάσημη φωτεινή κηλίδα φέρει τα ονόματα των τριών διάσημων επιστημόνων και καλείται Arago spot, Poisson spot, ή Fresnel bright spot.

2.6.1. Ερμηνεία του φαινομένου

Σύμφωνα με την αρχή του Huygens, κατά την πρόσπτωση του φωτός στην λεία μεταλλική επιφάνεια της σφαίρας, κάθε σημείο της σφαιρικής επιφάνειας δρα ως δευτερογενής πηγή φωτεινών κυμάτων. Τα φωτεινά αυτά κύματα καθώς διαδίδονται συμβάλουν άλλοτε δημιουργικά και άλλοτε καταστροφικά. Εκεί που τα κύματα συμβάλουν δημιουργικά παρατηρούμε φωτεινούς κροσσούς συμβολής ενώ εκεί που τα κύματα συμβάλουν καταστροφικά παρατηρούμε σκοτεινούς κροσσούς συμβολής. Όλες οι σημειακές φωτεινές πηγές είναι εν φάση στον άξονα διάδοσης της αρχικής φωτεινής δέσμης και για το λόγο αυτό παρατηρούμε την φωτεινή κηλίδα στο κέντρο της σκιάς ακριβώς πίσω από την μεταλλική σφαίρα. Σχηματικά, ο τρόπος εμφάνισης της φωτεινής κηλίδας παρουσιάζεται στην Εικόνα 23.



Εικόνα 23. Σχηματική απεικόνιση του μηχανισμού δημιουργίας της φωτεινής κηλίδας του Fresnel.

2.6.1.1. Πειραματική διαδικασία

Στην παράγραφο αυτή θα εκτελέσουμε το ιστορικό αυτό πείραμα το οποίο αποτέλεσε σταθμό στην μελέτη της φύσης του φωτός.

Υλικά

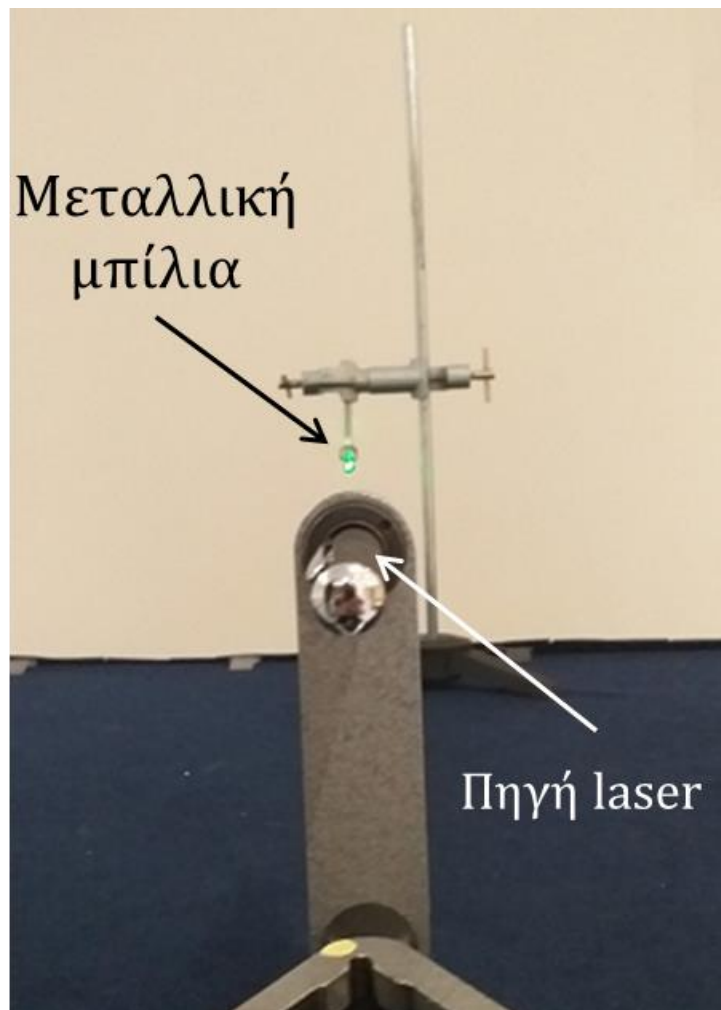
- Μία πηγή laser πράσινου χρώματος
- Μια μεταλλική μπίλια διαμέτρου $\sim 1\text{cm}$
- Μια λευκή οθόνη προβολής
- Μία βίδα
- Έναν μαγνήτη νεοδυμίου
- Έναν ορθοστάτη με ράβδο
- Έναν μεταλλικό σύνδεσμο για ορθοστάτη

Πραγματοποιούμε την διάταξη της Εικόνας 24 όπου προσαρτούμε την μεταλλική σφαίρα σε μία βίδα. Στη συνέχεια προσαρτούμε την όλη διάταξη σε έναν ορθοστάτη τον οποίο τοποθετούμε σε απόσταση $\sim 3\text{m}$ από την οθόνη προβολής. Σε απόσταση $\sim 1\text{m}$ από την μπίλια τοποθετούμε την πηγή laser (Εικόνα 25). Ευθυγραμμίζουμε την πηγή laser με την μπίλια και θέτουμε σε λειτουργία το laser. Στο λευκό πέτασμα περιμένουμε να παρατηρήσουμε μια φωτεινή κηλίδα στο κέντρο της σκιάς πίσω από την μεταλλική μπίλια, όπως αυτή της Εικόνας 26.

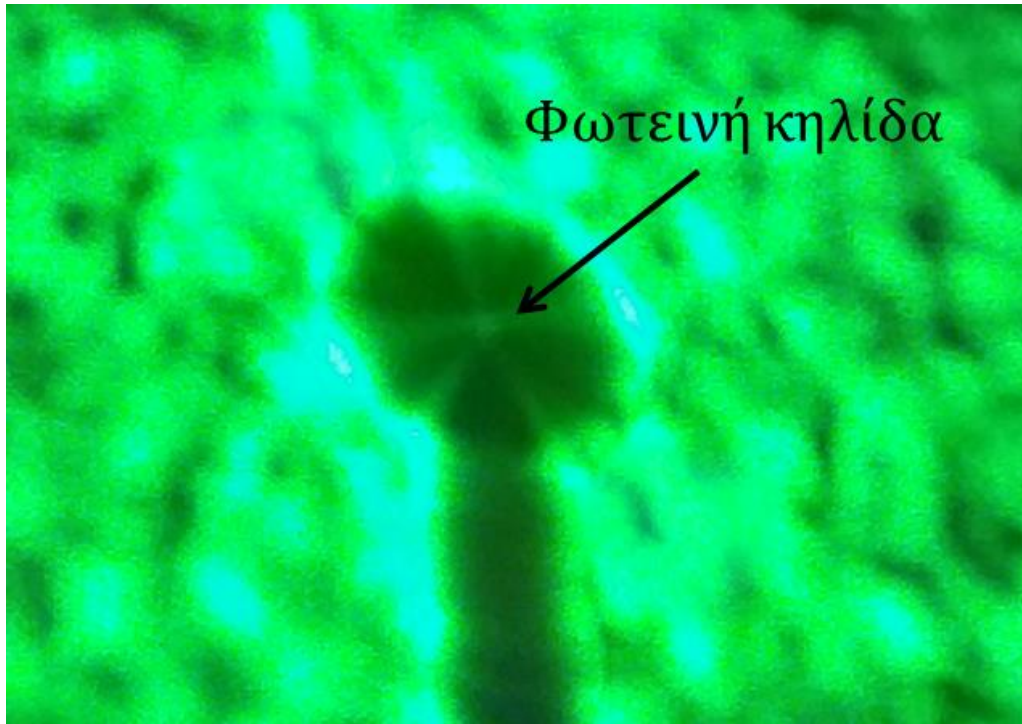
Παρατήρηση: Πριν θέσουμε την πηγή laser σε λειτουργία ζητάμε από τους μαθητές να προβλέψουν ποιο θα είναι το αποτέλεσμα του πειράματος.



Εικόνα 24. Με τη βοήθεια ενός μαγνήτη νεοδυμίου και μιας βίδας να αναρτούμε την μεταλλική σφαίρα.



Εικόνα 25. Διάταξη επίδειξης της φωτεινής κηλίδας του Fresnel.



Εικόνα 26. Η φωτεινή κηλίδα του Fresnel.

2.7. Η πόλωση του φωτός

Μετά την επιτυχία της κυματικής θεωρίας στην ερμηνεία των φαινομένων της περίθλασης και της συμβολής, οι Arago και Fresnel ασχολήθηκαν με τις ιδιότητες της πόλωσης. Το 1817 ο Fresnel έγινε ο πρώτος επιστήμονας που κατάφερε να μελετήσει το κυκλικά πολωμένο φως. Έτσι, το 1821 δημοσίευσε μια εργασία στην οποία ισχυρίστηκε ότι το φως είναι ένα εγκάρσιο κύμα, συμπέρασμα στο οποίο κατέληξε μελετώντας το φαινόμενο της πόλωσης.

2.7.1. Μηχανικό ανάλογο της πόλωσης του φωτός

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει χρήση ενός μηχανικού αναλόγου προκειμένου να αναδειχθεί το φαινόμενο της πόλωσης των φωτεινών κυμάτων. Στη συνέχεια θα γίνει χρήση δύο πολωτικών φίλτρων προκειμένου να αναδειχθεί το φαινόμενο της πόλωσης στην περίπτωση του φωτός.

2.7.1.1. Πειραματική διαδικασία

Υλικά

- 1 ελατήριο τύπου slinky



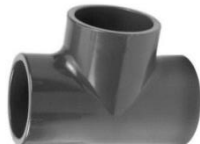
- 4 σωλήνες PVC διαμέτρου ~3 cm και μήκους 40 cm



- 2 γωνίες 90°



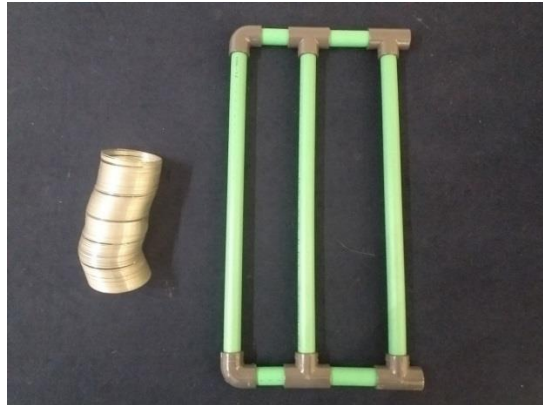
- 4 PVC ταφ 90°



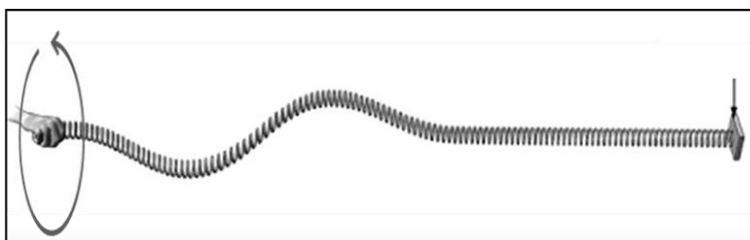
- 2 πολωτικά φίλτρα



Κατασκευάζουμε την πειραματική διάταξη όπως φαίνεται στην Εικόνα 27. Περνάμε το ελατήριο μέσα από το κενό μεταξύ των οριζόντων σωλήνων. Τεντώνουμε το ελατήριο και ζητάμε από μια μαθήτρια/μαθητή να κρατά το ένα άκρο του ελατηρίου σταθερό. Κρατώντας την άλλη άκρη του ελατηρίου ο καθηγητής/τρια πραγματοποιεί κυκλικές κινήσεις οι οποίες προκαλούν έναν κυματισμό στο ελατήριο (βλέπε Εικόνα 28). Ο τρόπος ταλάντωσης του ελατηρίου προσομοιώνει κυκλικά πολωμένο φως το οποίο διαδίδεται στο χώρο και προσπίπτει σε ένα πολωτικό φίλτρο. Τα κυκλικά πολωμένα κύματα που διαδίδονται στο ελατήριο αφού περάσουν από το “πολωτικό φίλτρο” πολώνονται στην οριζόντια διεύθυνση.



Εικόνα 27. Πάνω: Πειραματική διάταξη επίδειξης της πόλωσης του φωτός μέσω μηχανικού ανάλογου.



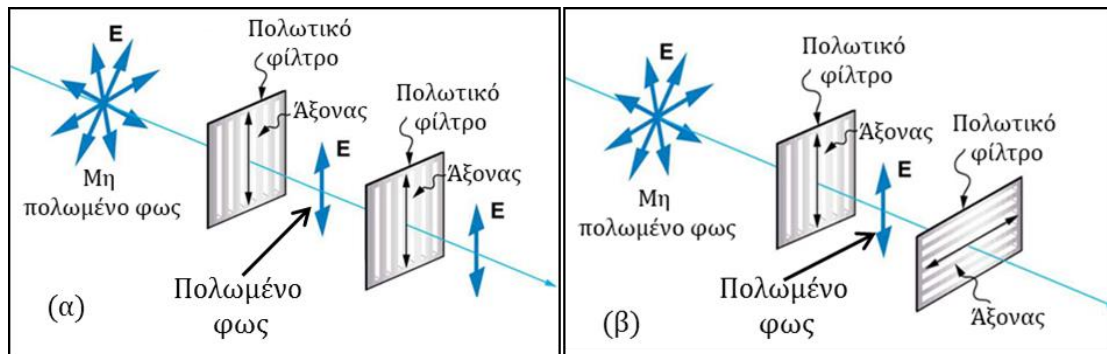
Εικόνα 28. Μηχανικό ανάλογο της πόλωσης του φωτός.

Χρησιμοποιώντας την ίδια διάταξη, ο καθηγητής/τρια μπορεί να προκαλέσει διαμήκη κύματα στο ελατήριο τα οποία δεν επηρεάζονται καθώς περνούν από το πολωτικό φίλτρο. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να δείξουμε ότι τα διαμήκη κύματα δεν εμφανίζουν το φαινόμενο της πόλωσης.

Στη συνέχεια ο καθηγητής/τρια θα κάνει χρήση των δύο πολωτικών φίλτρων και μιας πηγής φωτός, προκειμένου να επιδείξει το φαινόμενο της πόλωσης στην περίπτωση των φωτεινών κυμάτων. Αρχικά κρατάμε τα δύο πολωτικά φίλτρα παράλληλα μεταξύ τους μπροστά από μια φωτεινή πηγή όπως η λάμπα του δωματίου. Στη συνέχεια περιστρέφουμε το ένα από τα δύο πολωτικά φίλτρα κατά 90° (βλέπε Εικόνες 29 και 30).



Εικόνα. Η πόλωση του ορατού φωτός με χρήση πολωτικών φίλτρων.



Εικόνα 30. Εξήγηση του φαινομένου. (α) Το πολωμένο φως διέρχεται μέσα από το δεύτερο φίλτρο καθώς αυτό έχει άξονα πόλωσης παράλληλο με το πρώτο φίλτρο. (β) Καθώς το δεύτερο πολωτικό φίλτρο έχει περιστραφεί κατά 90° έχει άξονα πόλωσης κάθετο στη διεύθυνση πόλωσης του φωτός με αποτέλεσμα το φως να σβήνει εντελώς.

2.8. Εργαστήριο-Μέτρηση της ταχύτητας του φωτός

2.8.1. James Clerk Maxwell και η ηλεκτρομαγνητική θεωρία

Στις δεκαετίες του 1850 και του 1860 ο James Clerk Maxwell (1831-1879) δημιουργεί μια μαθηματικά διατυπωμένη θεωρία σύμφωνα με την οποία συνοψίζει όλα τα γνωστά ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα σε τέσσερις μόνο μαθηματικές εξισώσεις και ολοκληρώνει την κλασική εικόνα του φωτός. Σύμφωνα με αυτή το φως συνίσταται σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία.

Οι εξισώσεις του Maxwell περιγράφουν πλήρως και με ακρίβεια τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα και αποτελούν τα θεμέλια της κλασικής ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας, της οπτικής και των ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Οι εξισώσεις του Maxwell περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο ηλεκτρικά φορτία και ηλεκτρικά ρεύματα δημιουργούν ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία. Επίσης περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο ένα ηλεκτρικό πεδίο παράγει ένα μαγνητικό πεδίο και αντίστροφα.

Σε μια εργασία του το 1865 με τίτλο «Μια δυναμική θεωρία του Η/Μ πεδίου» ο Maxwell έδειξε τα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά πεδία διαδίδονται στο κενό, ως κύματα, με την ταχύτητα του φωτός ($3 \cdot 10^8$ m/s). Η διεύθυνση διάδοσης του Η/Μ κύματος είναι κάθετη τόσο στο ηλεκτρικό όσο και στο μαγνητικό πεδίο. Ως αποτέλεσμα τα Η/Μ κύματα είναι εγκάρσια.

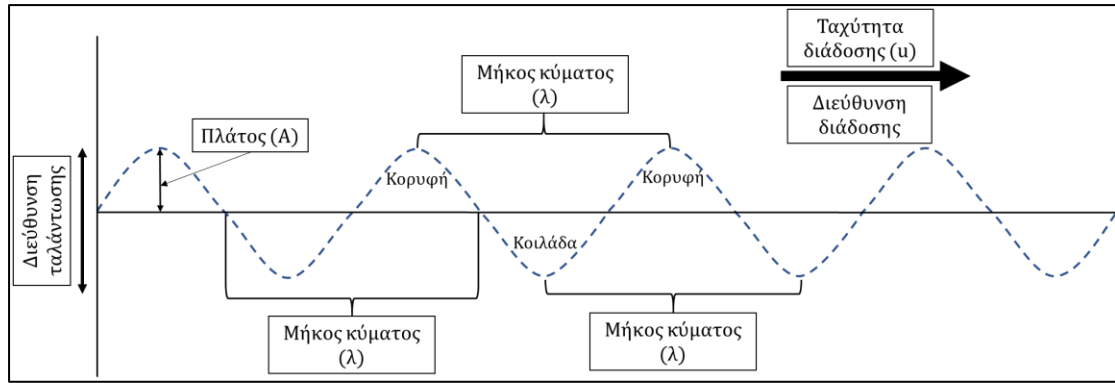
2.8.2. Κύματα

Κύμα είναι η διάδοση μιας διαταραχής που μεταφέρει ενέργεια και ορμή με σταθερή ταχύτητα, χωρίς όμως να μεταφέρει ύλη.

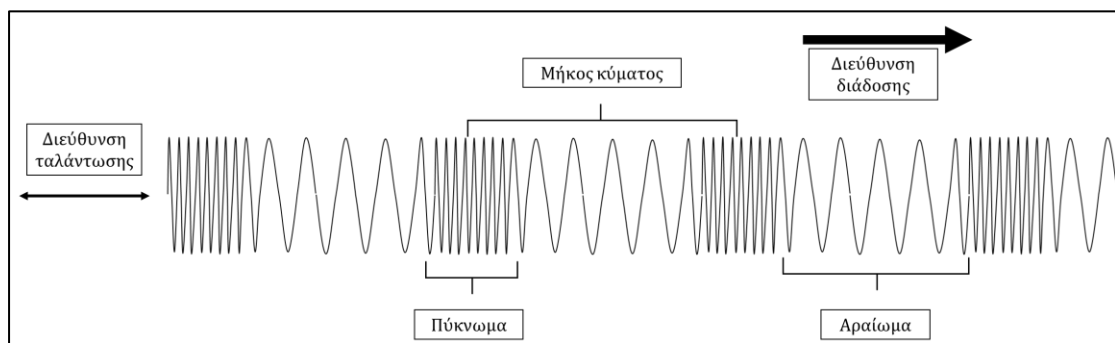
Για τη δημιουργία ενός κύματος απαιτείται η πηγή του κύματος (δηλαδή η αιτία που θα προκαλέσει μια διαταραχή) και το μέσο διάδοσης (ο χώρος μέσα στον οποίο διαδίδεται η διαταραχή).

Ανάλογα με τον μηχανισμό διάδοσης τα κύματα διακρίνονται σε μηχανικά και ηλεκτρομαγνητικά. Επίσης, με κριτήριο το μηχανισμό διάδοσης τα κύματα διακρίνονται σε Εγκάρσια (τα μόρια του μέσου ταλαντώνονται κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, βλέπε Εικόνα 31) & Διαμήκη (τα μόρια του μέσου ταλαντώνονται παράλληλα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, βλέπε Εικόνα 32).

- Τα εγκάρσια κύματα διαδίδονται στα στερεά και στην επιφάνεια των υγρών, σχηματίζοντας όρη και κοιλάδες (βλέπε Εικόνα 31).
- Τα διαμήκη κύματα διαδίδονται στα στερεά, υγρά και αέρια, σχηματίζοντας πυκνώματα και αραιώματα (βλέπε Εικόνα 32).



Εικόνα 31. Σχηματική αναπαράσταση εγκάρσιου κύματος. Στην εικόνα διακρίνονται τα όρη και οι κοιλάδες, το μήκος κύματος, το πλάτος ταλάντωσης και η ταχύτητα διάδοσης του κύματος.



Εικόνα 32. Σχηματική αναπαράσταση ενός διάμηκες κύματος. Στην εικόνα διακρίνονται τόσο το μήκος κύματος όσο και τα πυκνώματα και αραιώματα.

2.8.2.1. Μηχανικά κύματα

Τα κύματα που διαδίδονται σε ένα ελαστικό μέσο ονομάζονται μηχανικά κύματα και μεταφέρουν μηχανική ενέργεια χωρίς να μεταφέρουν ύλη. Η δημιουργία κάθε είδους μηχανικού κύματος απαιτεί κάποιο υλικό μέσα στο οποίο μεταφέρεται η μηχανική ενέργεια. Το υλικό αυτό ονομάζεται μέσο διάδοσης του κύματος.

Έτσι, για τη δημιουργία ενός μηχανικού κύματος χρειάζονται η πηγή του κύματος και ένα υλικό (μέσο) στο οποίο κάθε μόριο αλληλεπιδρά με τα γειτονικά του (ελαστικό μέσο).

Η πηγή των κυμάτων εκτελεί εξαναγκασμένη ταλάντωση που η ενέργειά της μεταδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις του μέσου διάδοσης, με ορισμένη ταχύτητα. Η διάδοση γίνεται μέσω των μορίων του μέσου, τα οποία αλληλεπιδρούν με τα γειτονικά τους. Τα μόρια του μέσου εκτελούν διαδοχικά την ίδια κίνηση με αυτή της πηγής αλλά με διαφορά φάσης, χωρίς να μεταφέρονται σε άλλες περιοχές του χώρου.

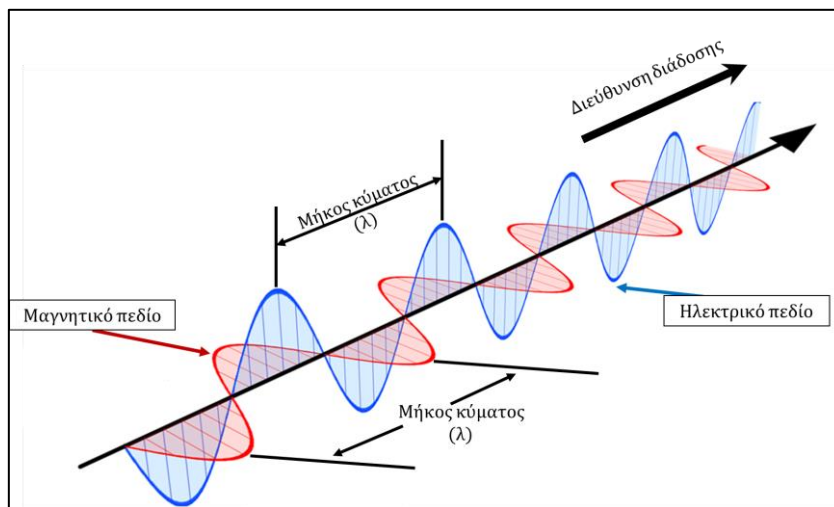
Τα μηχανικά κύματα έχουν δύο βασικά κοινά χαρακτηριστικά:

- α. Διαδίδονται μέσα στα υλικά μέσα.
- β. Μεταφέρουν μηχανική ενέργεια.

2.8.2.2. Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

Ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι η ταυτόχρονη διάδοση ενός ηλεκτρικού και ενός μαγνητικού πεδίου. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται στο κενό με την ταχύτητα του φωτός $c=3 \cdot 10^8$ m/s. Σε όλα τα υλικά διαδίδονται με μικρότερη ταχύτητα.

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα (ΗΜ) είναι ένα σύνθετο κύμα που αποτελείται από δύο εγκάρσια κύματα (ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό) κάθετα μεταξύ τους και κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (βλέπε Εικόνα 33), τα οποία βρίσκονται σε συμφωνία φάσης και διαδίδονται με την ίδια ταχύτητα (τη ταχύτητα του φωτός). Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα δε χρειάζεται μέσο διάδοσης.



Εικόνα 33. Σχηματική αναπαράσταση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

Χαρακτηριστικά μεγέθη του κύματος

Για να περιγράψουμε ένα κύμα χρησιμοποιούμε ορισμένα χαρακτηριστικά φυσικά μεγέθη: τη συχνότητα (f), την περίοδο (T), το πλάτος ταλάντωσης των σωματιδίων (A), την ταχύτητα (u) και το μήκος κύματος (λ).

- Συχνότητα ονομάζεται ο αριθμός των διαταραχών που δημιουργήθηκαν ή πέρασαν από ένα συγκεκριμένο σημείο ανά μονάδα χρόνου, δηλαδή ο αριθμός των διαταραχών διά του χρονικού διαστήματος στο οποίο μετρήσαμε τον αριθμό των διαταραχών. Συμβολίζεται με f και μετριέται σε Hz (1/sec).
- Περίοδος ονομάζεται το χρονικό διάστημα μεταξύ της δημιουργίας δύο διαδοχικών διαταραχών, ή της διέλευσης δύο διαδοχικών χαρακτηριστικών μιας διαταραχής, από ένα συγκεκριμένο σημείο του χώρου. Για παράδειγμα περίοδος είναι το χρονικό διάστημα που χρειάζεται για να περάσουν από έναν ακίνητο παρατηρητή δύο διαδοχικές κορυφές ή δύο διαδοχικές κοιλάδες. Η περίοδος συμβολίζεται με T και μετριέται σε s (δευτερόλεπτα).
- Από τον ορισμό της συχνότητας προκύπτει ότι η περίοδος και η συχνότητα συνδέονται με τη σχέση: $f = 1/T$.

- Πλάτος του κύματος ονομάζεται το πλάτος της ταλάντωσης των σωματιδίων του μέσου στο οποίο διαδίδεται το κύμα (βλέπε Εικόνα 31). Το πλάτος του κύματος σχετίζεται με το ποσό της ενέργειας που μεταφέρεται μέσω του κύματος. Όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος τόσο μεγαλύτερη είναι και η ενέργεια που μεταφέρεται.
- Μήκος κύματος (λ) είναι η απόσταση που διανύει το κύμα σε χρόνο μιας περιόδου (ή η απόσταση μεταξύ δύο σημείων που απέχουν το ίδιο από τη θέση ισορροπίας και κινούνται κατά την ίδια φορά-βλέπε Εικόνα 31).
- Το κύμα διαδίδεται στο χώρο. Η ταχύτητα της διαταραχής ονομάζεται ταχύτητα του κύματος (βλέπε Εικόνα 31). Εξαρτάται μόνο από το μέσο διάδοσης και δεν εξαρτάται από το πόσο ισχυρή είναι η διαταραχή.

2.8.2.3. Θεμελιώδης εξίσωση της κυματικής

Αν σε χρόνο Δt μια διαταραχή διαδίδεται σε απόσταση Δx από την πηγή παραγωγής της, το πηλίκο

$$u = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

είναι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος.

Σε χρόνο μιας περιόδου T η απόσταση που διανύει η διαταραχή είναι ίση με ένα μήκος κύματος λ . Τότε σύμφωνα με τον ορισμό της ταχύτητας u του κύματος ($u = x/t$) για $\Delta t = T$ και $\Delta x = \lambda$ προκύπτει ότι

$$u = \frac{\lambda}{T}$$

Επειδή όμως

$$f = \frac{1}{T}$$

προκύπτει ότι

$$u = \lambda \cdot f$$

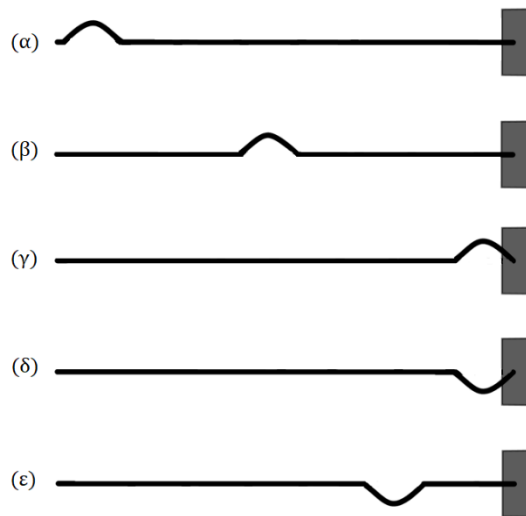
Η τελευταία σχέση καλείται θεμελιώδη σχέση της κυματικής

Στην περίπτωση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που διαδίδονται στο κενό, η ταχύτητα είναι $u = c$, όπου c η ταχύτητα του φωτός. Άρα:

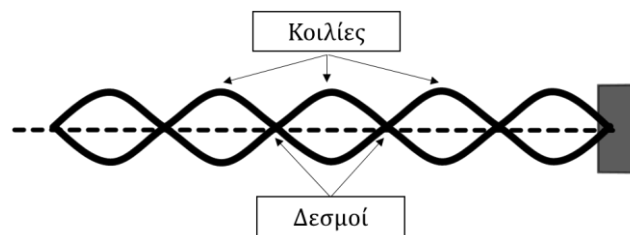
$$c = \lambda \cdot f$$

2.8.2.4. Στάσιμα κύματα

Έστω ότι έχουμε ένα σχοινί την μία άκρη του οποίου στερεώνουμε σε ένα ακλόνητο σημείο ενώ την άλλη άκρη κρατάμε στο χέρι μας και της δίνουμε μία ώθηση, όπως στην Εικόνα 34(α). Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένας παλμός (κύμα) το οποίο διαδίδεται κατά μήκος του σχοινοῦ όπως στην Εικόνα 34(β, γ). Όταν ο παλμός αυτός φτάσει στο σημείο στήριξης ανακλάται και διαδίδεται προς την αντίθετη κατεύθυνση, όπως στην Εικόνα 34(δ, ε). Αν εξαναγκάσουμε το ελεύθερο άκρο του σχοινοῦ να εκτελεί απλή αρμονική ταλάντωση το οδεύον κύμα προς τα δεξιά και το ανακλώμενο, προς τα αριστερά, συμβάλλουν προς σχηματισμό ενός στάσιμου κύματος το οποίο εμφανίζει δεσμούς και κοιλίες, όπως στην Εικόνα 35.



Εικόνα 34. Οδεύον και ανακλώμενο κύμα σε σχοινί πακτωμένο σε σταθερό σημείο.



Εικόνα 35. Στάσιμο κύμα. Στην εικόνα διακρίνονται οι δεσμοί και οι κοιλίες.

Στάσιμο κύμα ονομάζεται το αποτέλεσμα της συμβολής δύο κυμάτων της ίδιας συχνότητας και του ίδιου πλάτους που διαδίδονται στο ίδιο μέσο με αντίθετες κατευθύνσεις.

Αν φωτογραφίσουμε το σχοινί σε διάφορες χρονικές στιγμές, θα παρατηρήσουμε ότι υπάρχουν σημεία στο σχοινί που παραμένουν διαρκώς ακίνητα. Τα σημεία αυτά καλούνται δεσμοί. Σε αντίθεση με τους δεσμούς όλα τα άλλα σημεία εκτελούν ταλάντωση με την ίδια συχνότητα. Όμως, το πλάτος της ταλάντωσης δεν είναι ίδιο για όλα τα σημεία που ταλαντώνονται. Μέγιστο πλάτος έχουν τα σημεία που βρίσκονται στο μέσο της απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών δεσμών και καλούνται κοιλίες.

2.8.3. Πειραματική διαδικασία

Υλικά

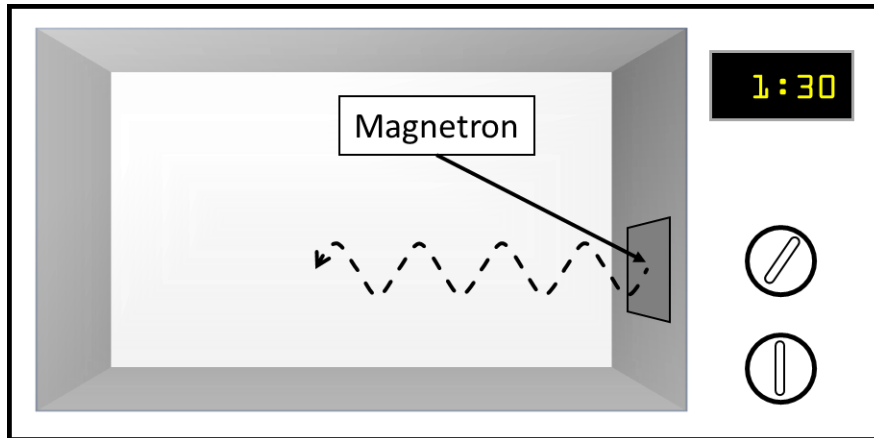
- Φούρνος μικροκυμάτων
- 1 μεγάλο πιάτο
- 4 φέτες ψωμί του τοστ
- Βούτυρο
- 1 μαχαίρι επάλειψης

2.8.3.1. Οδηγίες

1. Αφαιρούμε τον περιστρεφόμενο γυάλινο δίσκο από το εσωτερικό του φούρνου μικροκυμάτων.
2. Τοποθετούμε το μεγάλο πιάτο, ανάποδα, πάνω από την περιστρεφόμενη βάση έτσι ώστε όταν ο φούρνος είναι σε λειτουργία το πιάτο να μην περιστρέφεται.
3. Αλείφουμε τις 4 φέτες ψωμί με μια παχιά στρώση βούτυρο και τις τοποθετούμε πάνω στο πιάτο σχηματίζοντας ένα μεγάλο τετράγωνο. Καλύπτουμε με βούτυρο τα σημεία στα οποία ενώνονται οι 4 φέτες ψωμί.
4. Θέτουμε τον φούρνο σε λειτουργία για 10-15 sec μέχρις ότου το βούτυρο αρχίσει οριακά να λιώνει. Ελέγχουμε την επιφάνεια του ψωμιού κάθε 4-5 δευτερόλεπτα.
5. Προσοχή!!! Δεν παρατείνουμε χρονικά τη διαδικασία γιατί τότε θα λιώσει όλο το βούτυρο.
6. Αφαιρούμε τις φέτες του ψωμιού από τον φούρνο. Παρατηρούμε τα σημεία στα οποία έχει λιώσει το βούτυρο. Αν το πείραμα έχει διεξαχθεί επιτυχώς, θα παρατηρήσουμε πως το βούτυρο έχει λιώσει σε πολύ συγκεκριμένες περιοχές οι οποίες απέχουν μεταξύ τους σχεδόν σταθερά διαστήματα.
7. Μετράμε την απόσταση μεταξύ αυτών των περιοχών. Πολλαπλασιάζουμε την απόσταση αυτή επί δύο. Με τον τρόπο αυτό βρίσκουμε το μήκος κύματος της μικροκυματικής ακτινοβολίας που παράγει ο φούρνος προκειμένου να ζεστάνει το φαγητό μας.
8. Στο πίσω μέρος του φούρνου υπάρχει ένα ταμπελάκι στο οποίο αναγράφονται τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του. Σημειώνουμε την συχνότητα λειτουργίας του φούρνου η οποία δίνεται είτε σε GHz είτε σε MHz.
9. Πολλαπλασιάζοντας το μήκος κύματος που μετρήσαμε με την συχνότητα λειτουργίας του φούρνου μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα του φωτός.

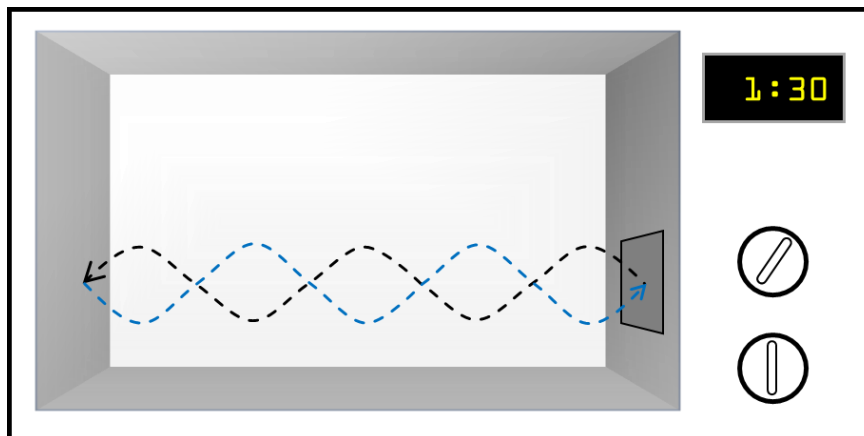
2.8.3.2. Εξήγηση

Η λειτουργία του φούρνου μικροκυμάτων βασίζεται στην παραγωγή μικροκυματικής ακτινοβολίας. Τα μικροκύματα είναι ένας τύπος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας όπως και τα ραδιοκύματα, η υπέρυθρη ακτινοβολία, η ορατή η υπεριώδης, οι ακτίνες X και οι ακτίνες γ . Στο εσωτερικό του φούρνου παράγονται μικροκύματα από μία συσκευή η οποία καλείται magnetron και βρίσκεται στο εσωτερικό δεξιά πλάγιο τοίχωμα του φούρνου (Βλέπε Εικόνα 36).



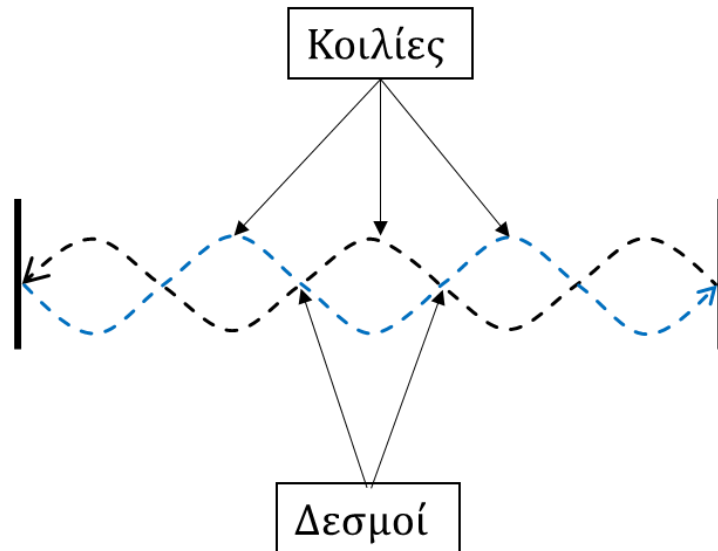
Εικόνα 36. Σχηματική αναπαράσταση του εσωτερικού ενός φούρνου μικροκυμάτων.

Τα μικροκύματα που παράγονται ταξιδεύουν από τη δεξιά πλευρά του φούρνου ανακλώνται στο αριστερό εσωτερικό τοίχωμα και επιστρέφουν στο δεξί τοίχωμα όπου και ανακλώνται ξανά. Τα μικροκύματα ανακλώνται μπρος - πίσω ξανά και ξανά σχηματίζοντας ένα στάσιμο κύμα στο εσωτερικό του φούρνου (βλέπε Εικόνα 37).



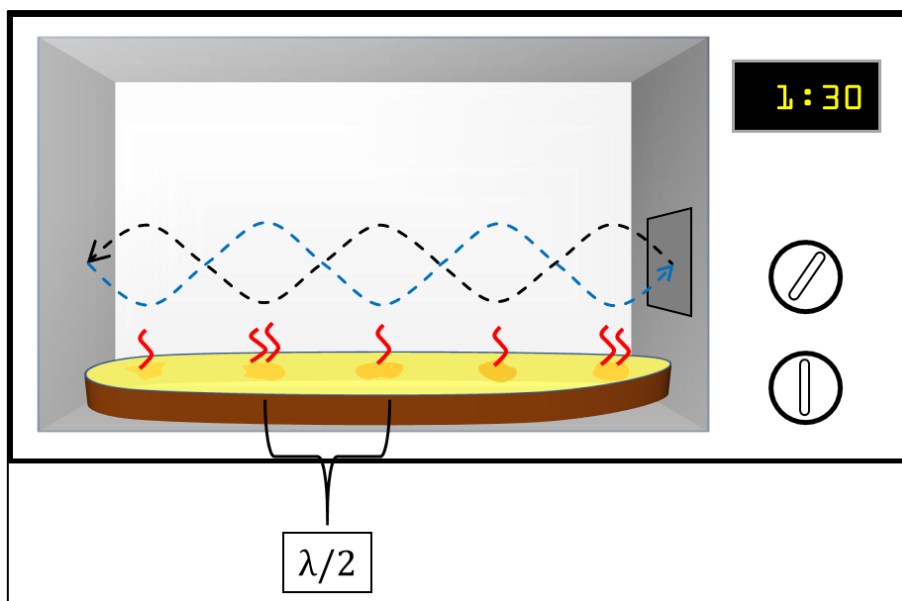
Εικόνα 37. Σχηματική αναπαράσταση της ανάπτυξης στάσιμων κυμάτων στο εσωτερικό του φούρνου μικροκυμάτων

Ως αποτέλεσμα θα υπάρχουν περιοχές όπου τα μικροκύματα είναι πολύ ισχυρά (κοιλίες-βλέπε Εικόνες 38, 39) και στις περιοχές αυτές τα μόρια του βουτύρου θα ταλαντώνονται εξαιρετικά έντονα με αποτέλεσμα να θερμαίνονται (βλέπε Εικόνες 38, 39). Σε αντίθεση, θα υπάρχουν περιοχές όπου τα μικροκύματα είναι πολύ ασθενή (δεσμοί-βλέπε Εικόνες 38, 39) και στις περιοχές αυτές τα μόρια του βουτύρου δεν ταλαντώνονται καθόλου με αποτέλεσμα να μην θερμαίνονται (βλέπε Εικόνες 38, 39). Για τον λόγο αυτό υπάρχει η περιστρεφόμενη βάση στο εσωτερικό του φούρνου μικροκυμάτων έτσι ώστε να θερμαίνονται όλες οι περιοχές του φαγητού ομοιόμορφα. Σε κάθε άλλη περίπτωση θα βγάλαμε το φαγητό μας από τον φούρνο και αυτό θα χαρακτηριζόταν από ζεστές και κρύες περιοχές.



Εικόνα 38. Σχηματική αναπαράσταση ενός στάσιμου κύματος. Στην εικόνα διακρίνονται οι δεσμοί και οι κοιλίες

Η απόσταση μεταξύ μιας ζεστής και μιας κρύας περιοχής στην επιφάνεια του ψωμιού αντιστοιχεί σε μισό μήκος κύματος (βλέπε Εικόνα 39). Γενικά, η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών δεσμών, ή κοιλιών είναι ίση με το μισό του μήκους κύματος των κυμάτων από τη συμβολή των οποίων προήλθε το στάσιμο κύμα.



Εικόνα 39. Σχηματική αναπαράσταση του τελικού αποτελέσματος. Στην εικόνα διακρίνονται οι περιοχές στην επιφάνεια του ψωμιού όπου το βούτυρο έχει λιώσει. Η απόσταση μεταξύ δύο τέτοιων διαδοχικών περιοχών ισούται με το μισό του μήκους κύματος των στάσιμων κυμάτων της μικροκυματικής ακτινοβολίας

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα καλύπτουν ένα ευρύτατο φάσμα μηκών κύματος και συχνοτήτων. Η έκταση του φάσματος αυτού παρουσιάζεται στην Εικόνα 40, στην

οποία σημειώνονται προσεγγιστικά οι περιοχές μήκους κύματος και συχνότητας των διαφόρων τμημάτων του.

Εφόσον όλα διαδίδονται στο κενό με την ταχύτητα c , η συχνότητά τους (f) και το μήκος κύματος (λ) συνδέονται με τη σχέση:

$$c = \lambda \cdot f$$

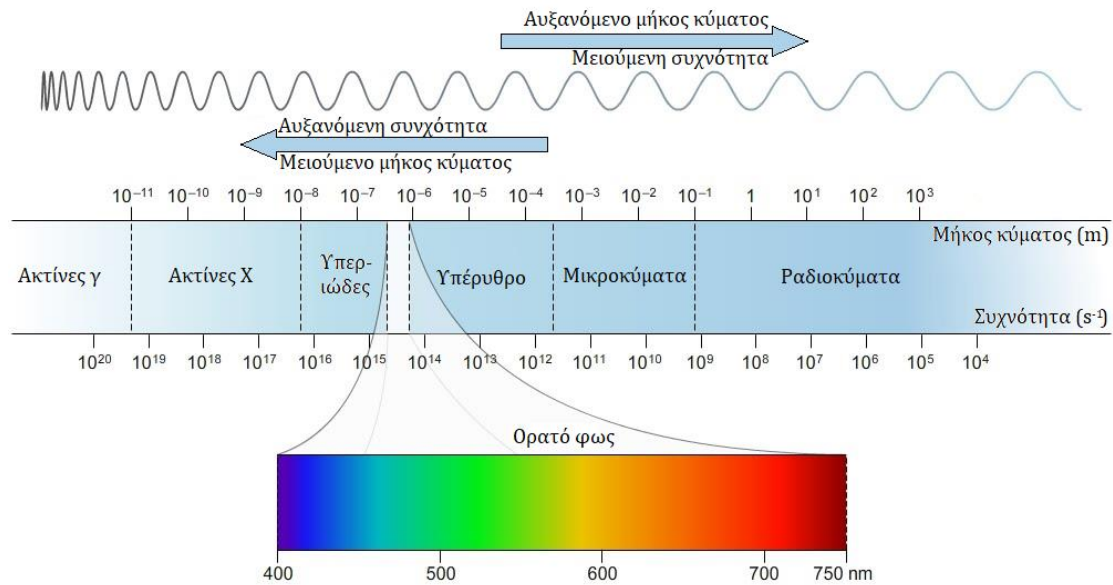
όπου

c : η ταχύτητα του φωτός σε m/s

λ : το μήκος κύματος σε m

f : η συχνότητα σε Hz

- Για να υπολογίσουμε την ταχύτητα του φωτός πολλαπλασιάζουμε το μήκος κύματος που μετρήσαμε μέσω της πειραματικής διαδικασίας με την συχνότητα λειτουργίας του φούρνου μικροκυμάτων.

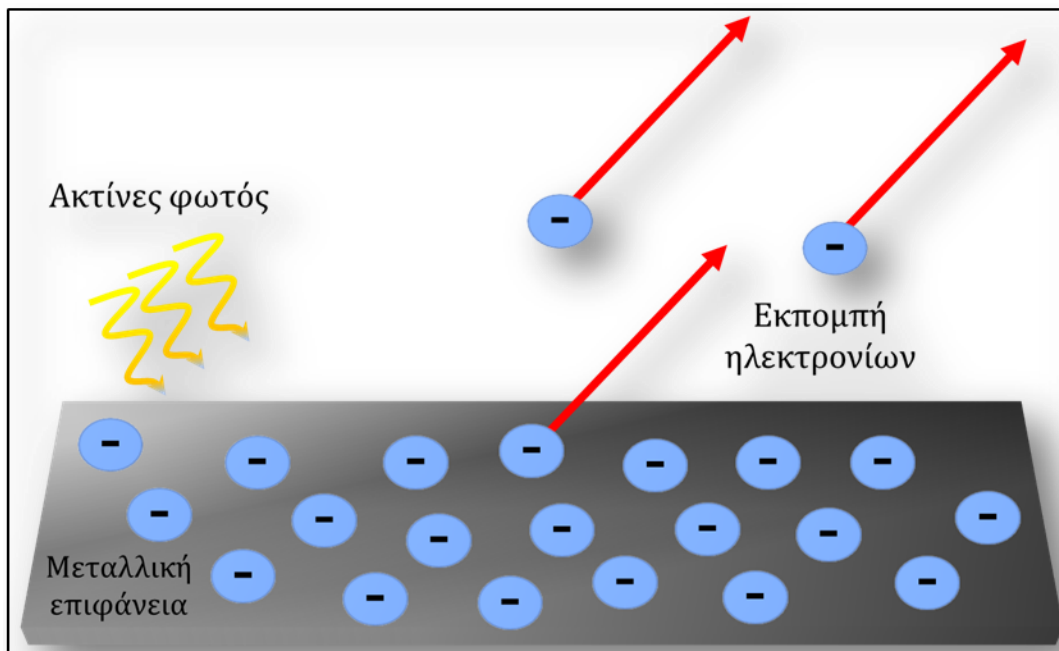


Εικόνα 40. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Σημειώνονται προσεγγιστικά οι περιοχές μήκους κύματος και συχνότητας των διαφόρων τμημάτων του.

- ❖ Παρατήρηση: Η απόσταση μεταξύ των περιοχών που το βούτυρο έχει λιώσει θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 6-7 cm. Σημειώνεται ότι οι τυπικοί φούρνοι μικροκυμάτων της αγοράς χαρακτηρίζονται από συχνότητα 2.450 MHz

2.9. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Περί τα τέλη του 19^{ου} αιώνα αρκετοί ερευνητές (Heinrich Hertz, Wilhelm Hallwachs, Augusto Righi και Aleksandr Stoletow) παρατήρησαν ότι το φως ήταν ικανό να απελευθερώσει ηλεκτρόνια από μεταλλικές επιφάνειες (Εικόνα 41). Το εν λόγω φαινόμενο ονομάστηκε φωτοηλεκτρικό και τα εκπεμπόμενα ηλεκτρόνια φωτοηλεκτρόνια.



Εικόνα 41. Σχηματική αναπαράσταση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο αρχικά δεν εξήγησε τους ερευνητές καθώς η απελευθέρωση ηλεκτρονίων μπορούσε να εξηγηθεί μέσω της κλασικής μηχανικής μέσω τους ακόλουθου μηχανισμού: Τα προσπίπτοντα φωτεινά κύματα προκαλούν δονήσεις στα ηλεκτρόνια του μετάλλου με πλάτος το οποίο συνεχώς αυξάνεται μέχρι το σημείο που το ηλεκτρόνιο αποκτά την απαραίτητη ενέργεια για να εκτιναχθεί από την επιφάνεια του μετάλλου όπως και οι σταγόνες του νερού εκτινάσσονται από την επιφάνεια του νερού που βράζει. Επίσης, σύμφωνα με την κλασική φυσική αν η φωτεινή πηγή είναι ασθενής θα χρειαστεί σημαντικός χρόνος μέχρι η επιφάνεια του μετάλλου να θερμανθεί αρκετά ώστε να απελευθερωθούν τα ηλεκτρόνια. Παρόλα αυτά, η προσεχτική μελέτη του φαινομένου οδήγησε σε παρατηρήσεις εντελώς αντίθετες από τις προβλέψεις της κλασικής κυματικής θεωρίας.

Τα παρατηρησιακά δεδομένα καταδείκνυαν ότι:

1. Ο χρόνος που μεσολαβεί από το άναμμα του φωτός και την απελευθέρωση των ηλεκτρονίων ήταν ανεξάρτητος από την ένταση και τη συχνότητα του φωτός. Δεν παρατηρούνταν χρονική καθυστέρηση μεταξύ της πρόσπτωσης του φωτός και της απελευθέρωσης των ηλεκτρονίων.
2. Το φαινόμενο παρατηρούνταν με ιώδες ή υπεριώδες φως αλλά όχι με ερυθρό.
3. Ο ρυθμός απελευθέρωσης των ηλεκτρονίων ήταν ανάλογος της έντασης του φωτός.

4. Η μέγιστη ενέργεια των ηλεκτρονίων που απελευθερώνοντουσαν ήταν ανεξάρτητη από την ένταση του φωτός αλλά ήταν ανάλογη της συχνότητάς του.

Η απουσία χρόνου καθυστέρησης δεν ήταν δυνατόν αν ερμηνευθεί με την κυματική εικόνα του φωτός. Σύμφωνα με την κυματική εικόνα όταν μια δέσμη φωτός προσπίπτει στην μεταλλική επιφάνεια, η ενέργειά της δεν απορροφάται από ένα μόνο ηλεκτρόνιο αλλά ισομοιράζεται σε όλα τα ηλεκτρόνια τα οποία βρίσκονται στην επιφάνεια του μετάλλου που προσπίπτει το φως. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα κάθε ηλεκτρόνιο να απορροφά ένα πολύ μικρό ποσό ενέργειας. Άρα, προκειμένου τα ηλεκτρόνια να αποκτήσουν το απαραίτητο ποσό ενέργειας για να διαφύγουν από το μέταλλο, θα πρέπει να απορροφήσουν την ενέργεια αρκετών φωτεινών κυμάτων γεγονός που απαιτεί την παρέλευση ενός χρονικού διαστήματος. Σε αντίθεση η παρατηρήσεις έδειχναν την άμεση απόσπαση ηλεκτρονίων ακόμη και με το πιο αμυδρό υπεριώδες φως.

Η παρατήρηση πως η ένταση του φωτός δεν επηρέαζε την ενέργεια των ηλεκτρονίων που απελευθερώνονταν περιέπλεκε περισσότερο τα πράγματα. Τα ισχυρότερα ηλεκτρικά πεδία του πιο έντονου ορατού φωτός δεν ανάγκαζαν τα ηλεκτρόνια να εξέλθουν με μεγαλύτερη ταχύτητα. Στο εντονότερο φως απελευθερώνονταν περισσότερα ηλεκτρόνια αλλά όχι ταχύτερα. Από την άλλη, μια ασθενής δέσμη υπεριώδους φωτός απελευθέρωνε λιγότερα ηλεκτρόνια αλλά με πολύ μεγαλύτερη κινητική ενέργεια.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο καταδείκνυε ότι: (α) η ενέργεια του φωτός δεν είναι ανάλογη της έντασής του αλλά είναι ανάλογη της συχνότητας, (β) η μέγιστη κινητική ενέργεια των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων είναι ανεξάρτητη της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας αλλά είναι ανάλογη της συχνότητας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και (γ) η εκπομπή των ηλεκτρονίων λαμβάνει χώρα ακαριαία με την πρόσπτωση ακτινοβολίας, της κατάλληλης συχνότητας, στην επιφάνεια του μετάλλου.

Ο Einstein έδωσε την απάντηση στο αίνιγμα του φωτοηλεκτρικού φαινομένου το 1905. Το κλειδί στην ερμηνεία του φαινομένου ήταν η κβαντική θεωρία της ακτινοβολίας του Γερμανού θεωρητικού φυσικού Max Planck. Ο Planck είχε δείξει πως η ενέργεια των δονούμενων ηλεκτρονίων στις φωτεινές πηγές πυράκτωσης βρίσκεται μόνο σε διακριτές τιμές. Αυτό έχει ως συνέπεια η ακτινοβολία να εκπέμπεται σε διακριτά ποσά ενέργειας τα οποία ονόμασε κβάντα. Αυτή η θεώρηση είναι πολύ διαφορετική από την θεώρηση της κλασικής Νευτώνιας φυσικής σύμφωνα με την οποία ένα σύστημα μπορεί να έχει οποιαδήποτε μορφή ενέργειας. Σε αντίθεση, στην κβαντική φυσική μόνο ορισμένες τιμές είναι δυνατές. Υπάρχουν δηλαδή, τιμές ενέργειας τις οποίες ένα σύστημα είναι απλώς αδύνατο να τις αποκτήσει. Η ενέργεια έρχεται σε πακέτα ή κβάντα και μόνο ακέραιος αριθμός κβάντων μπορεί να υπάρχει.

Ο Planck είχε υποθέσει πως η εκπομπή του φωτός κατά κβάντα οφείλονταν σε περιορισμούς των δονούμενων ηλεκτρονίων, τα οποία παρήγαγαν το φως, το οποίο θεώρησε πως ήταν διακριτοί παλμοί των H/M κυμάτων που είχε περιγράψει ο Maxwell.

Ο Einstein προκειμένου να ερμηνεύσει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο απέδωσε κβαντικές ιδιότητες στο ίδιο το φως αντιμετωπίζοντας την ακτινοβολία ως βροχή από σωματίδια. Το φως δηλαδή αποτελείται από διακριτά πακέτα ενέργειας ή αλλιώς κβάντα ενέργειας ή φωτόνια. Έτσι, ένα φωτόνιο απορροφάται πλήρως από κάθε ηλεκτρόνιο που εκτινάσσεται από το μέταλλο. Η απορρόφηση είναι μια διαδικασία, που ή γίνεται εξ'ολοκλήρου ή δεν γίνεται καθόλου και είναι άμεση με αποτέλεσμα να μην υπάρχει καθυστέρηση όπως με τα κύματα.

Η μικρότερη ποσότητα ενέργειας που μπορεί να μετατραπεί σε φως συχνότητας f δίνεται από τη σχέση:

$$E = h \cdot f,$$

όπου h είναι η σταθερά του Planck.

Γενικεύοντας, ο Einstein πρότεινε ότι η εκπομπή η διάδοση και η απορρόφηση ακτινοβολίας λαμβάνει χώρα υπό την μορφή φωτονίων.

Όσον αφορά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, ο Einstein πρότεινε:

1. Η ενέργεια των ηλεκτρονίων δεν εξαρτάται από την ένταση του φωτός. Κάθε ηλεκτρόνιο απορροφά ένα φωτόνιο. Αν η απορροφούμενη ενέργεια είναι αρκούντως υψηλή για να απελευθερώσει το ηλεκτρόνιο από το υλικό, τότε το ηλεκτρόνιο θα διαφύγει. Αν όχι, το ηλεκτρόνιο διαχέει την ενέργεια αυτή μέσω των συγκρούσεών του με γειτονικά ηλεκτρόνια και άτομα προτού απορροφήσει ένα άλλο φωτόνιο.
2. Τα ηλεκτρόνια διαφεύγουν από την μεταλλική πλάκα μόλις φως κατάλληλης συχνότητας προσπίπτει στην πλάκα. Από τη στιγμή που ένα φωτόνιο, που χτυπά την πλάκα, έχει την απαραίτητη ενέργεια θα απελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Δεν χρειάζεται να περιμένουμε ώστε πολλαπλά μέτωπα κύματος να χτυπήσουν την μεταλλική πλάκα ώστε το ηλεκτρόνιο να συγκεντρώσει το απαραίτητο ποσό ενέργεια για να διαφύγει.
3. Κανένα ηλεκτρόνιο δεν απελευθερώνεται αν η συχνότητα του φωτός είναι κάτω από μία κρίσιμη τιμή η οποία ονομάζεται συχνότητα κατωφλίου. Επειδή η ενέργεια του φωτονίου είναι $E = h \cdot f$ τότε κάτω από μια συγκεκριμένη συχνότητα το φωτόνιο δεν έχει αρκετή ενέργεια ώστε να απελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο από την μεταλλική πλάκα.
4. Η μέγιστη κινητική ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων θα πρέπει να είναι ευθέως ανάλογη της συχνότητας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Όταν ένα φωτόνιο, κατάλληλης συχνότητας, προσπίπτει στην πλάκα απορροφάται πλήρως και ένα μέρος της ενέργειάς τους χρησιμοποιείται για την εξαγωγή ηλεκτρονίου ενώ το υπόλοιπο ποσό αποδίδεται ως κινητική ενέργεια στο ηλεκτρόνιο.

2.9.1. Πειραματική διαδικασία

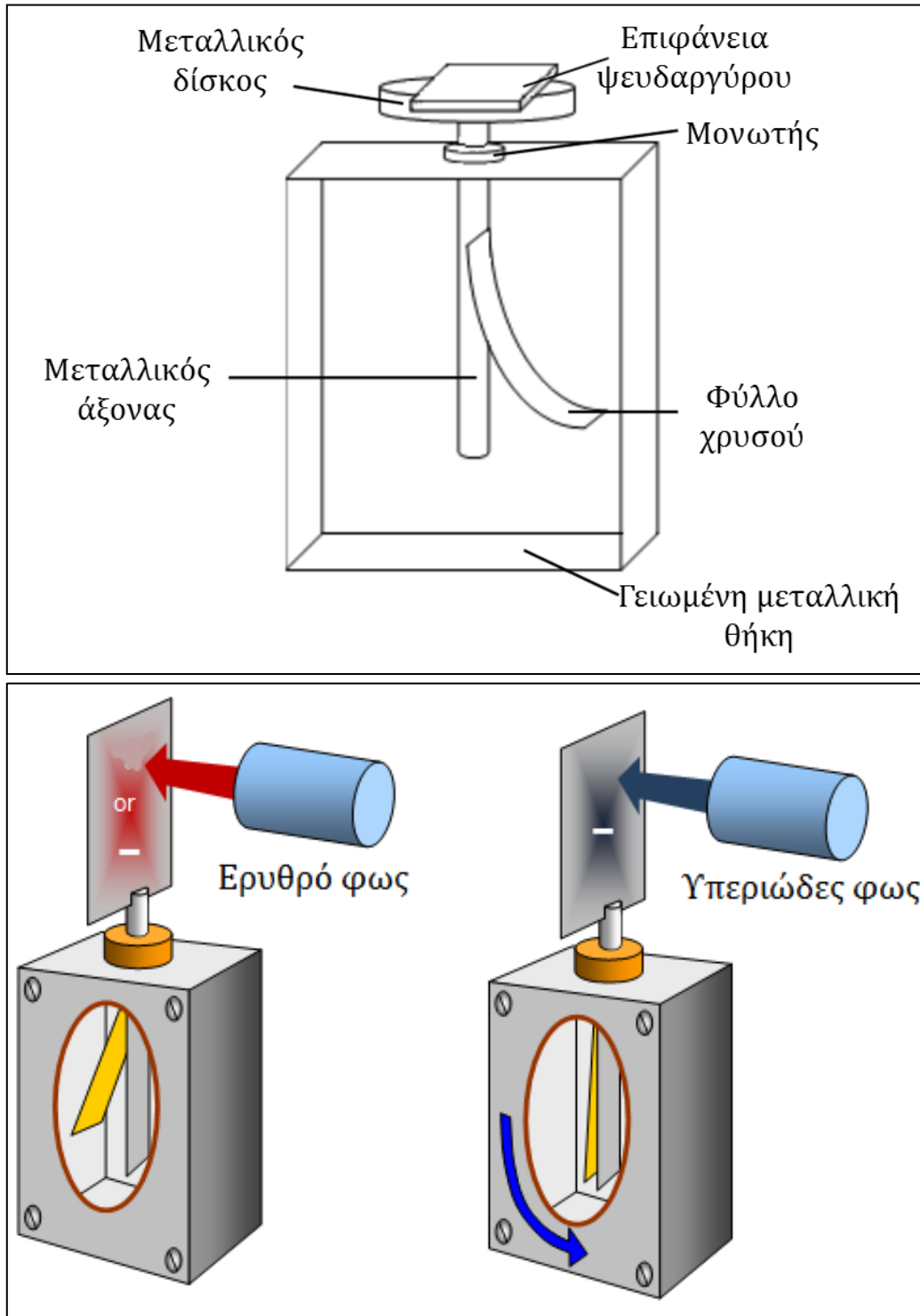
Υλικά

- Ένα ηλεκτροσκόπιο με φύλλο χρυσού
- Μια επιφάνεια ψευδαργύρου διαστάσεων 4 cm x 4 cm
- Έναν σωλήνα pnc
- Μάλλινο ύφασμα
- Μια λάμπα UVC
- Έναν φακό μεγάλης έντασης

2.9.1.1. Πειραματική διαδικασία

Τοποθετούμε την επιφάνεια ψευδαργύρου στο ηλεκτροσκόπιο. Με την βοήθεια του σωλήνα pnc και του μάλλινου υφάσματος φορτίζουμε το ηλεκτροσκόπιο. Αρχικά χρησιμοποιούμε τον φακό και ρίχνουμε ορατό φως μεγάλης έντασης στην μεταλλική επιφάνεια του ηλεκτροσκοπίου. Παρατηρούμε ότι δεν συμβαίνει τίποτα. Στη συνέχεια χρησιμοποιούμε την λάμπα UVC και ρίχνουμε φως χαμηλότερης έντασης στην

επιφάνεια του ηλεκτροσκοπίου. Παρατηρούμε ότι το φύλλο χρυσού επανέρχεται στην αρχική του θέση γεγονός που καταδεικνύει την εξαγωγή ηλεκτρονίων από την μεταλλική πλάκα του ηλεκτροσκοπίου και εν συνεχεία την αποφόρτισή του (βλέπε Εικόνα 42).



Εικόνα 42. Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διαδικασίας επίδειξης του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

2.9.2. Συμπεράσματα

- Το ποσό της ενέργειας του φωτός εξαρτάται από την συχνότητα και όχι την ένταση. Το φως δεν είναι μια συνεχής ροής ενέργειας αλλά αποτελείται από πακέτα ενέργειας. Τα πακέτα ενέργειας καλούνται φωτόνια. Το κάθε φωτόνιο έχει συγκεκριμένη ενέργεια. Όλα τα φωτόνια της ίδιας φωτεινής πηγής έχουν την ίδια ενέργεια.
- Τα ηλεκτρόνια απελευθερώνονται από την επιφάνεια του ψευδαργύρου μόνο όταν η συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολία είναι μεγαλύτερη από μια συγκεκριμένη τιμή. Αυτή η τιμή καλείται συχνότητα κατωφλίου.
- Διαφορετικά στοιχεία απαιτούν διαφορετικά ποσά ενέργεια ώστε να απελευθερώσουν ηλεκτρόνια μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.
- Το φωτόνιο είναι ένα πακέτο ενέργειας. Έτσι, α) υπάρχουν περισσότερα φωτόνια σε φως μεγαλύτερης έντασης και β) υπάρχουν περισσότερα φωτόνια στο ορατό φως από ότι στο υπεριώδες αν έχουν την ίδια ένταση. Αυτό επειδή το κάθε φωτόνιο του υπεριώδους έχει μεγαλύτερη ενέργεια. Η ένταση του φωτός είναι ανάλογη της συνολικής ποσότητας ενέργειας και έτσι η ενέργεια διαμοιράζεται σε λιγότερα φωτόνια στην περίπτωση της υπεριώδους ακτινοβολίας.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο αποδεικνύει ότι το φως έχει σωματιδιακές ιδιότητες. Τα φαινόμενα της συμβολής, της περίθλασης, της πόλωσης καταδεικνύουν την κυματική φύση του φωτός και δεν μπορούν να ερμηνευθούν μέσω του σωματιδιακού μοντέλου.

Στην κλασική φυσική αυτό φαίνεται πως είναι, και είναι αντιφατικό. Από την άποψη όμως της κβαντικής φυσικής, το φως έχει ιδιότητες που το κάνουν να μοιάζει και με τα δύο. Το φως συμπεριφέρεται «ακριβώς όπως ένα κύμα» ή «ακριβώς όπως ένα σωματίδιο» ανάλογα με το πείραμα. Συνεπώς το φως έχει διπλή φύση και θα πρέπει να το φανταζόμαστε όχι σαν σωματίδιο ή σαν κύμα αλλά ως «κυματοσωμάτιο».

Η διπλή συμπεριφορά του φωτός, που περιγράφεται με τον όρο "κυματοσωματιδιακός δυϊσμός".

Το 1927 ο Paul Adrien Dirac (1902–1982) δημοσιεύει μια εργασία του στην οποία περιγράφει την κυματική και σωματιδιακή φύση του φωτός σε μία ενιαία θεωρία. Ο Dirac μαζί με τους Richard Feynman, Shinichiro Tomonaga, και Julian Schwinger έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στη θεμελίωση της κβαντικής μηχανικής και της κβαντικής ηλεκτροδυναμικής (σχετικιστική κβαντική θεωρία πεδίου της ηλεκτροδυναμικής).

Σημειώνεται πως μεταξύ άλλων ο Dirac διατύπωσε την ομώνυμη εξίσωση η οποία περιγράφει τη συμπεριφορά των φερμιονίων (κουαρκ, λεπτόνια) και προέβλεψε την ύπαρξη της αντιύλης.

2.10. Εργαστήριο-Μέτρηση της σταθεράς του Planck

Παρ'ότι αρχικά ο Planck εισήγαγε τη σταθερά h καθαρά φορμαλιστικά, αποδείχτηκε μεγάλης σημασίας για την κβαντική μηχανική, αφού υπεισέρχεται σε πολλές θεμελιώδεις εξισώσεις όπως η εξίσωση του Dirac, η εξίσωση του De Broglie και η αρχή αβεβαιότητας του Heisenberg.

Μάλιστα, το 2019, στην προσπάθεια αντικατάστασης και ορισμού θεμελιωδών μεγεθών με βάση φυσικές σταθερές, η σταθερά του Planck αποτέλεσε βάση για τον εκ νέου ορισμό του κιλού (kg).

Η σταθερά του Planck, έχει τιμή $h = 6.6260701(1) \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec}$

2.10.1. Πειραματική διαδικασία

Το εργαστήριο αυτό θα πραγματοποιηθεί από τους μαθητές οι οποίοι καλούνται να κατασκευάσουν την πειραματική διάταξη, να εκτελέσουν το πείραμα, να κάνουν μετρήσεις, να εφαρμόσουν μαθηματικές εξισώσεις για τον υπολογισμό της σταθεράς του Planck και τέλος να υπολογίσουν το σφάλμα μέτρησης.

Υλικά

- 4 λαμπάκια LED – κόκκινο, πράσινο, μπλε και λευκό



- 1 φράγμα περίθλασης με 500 γραμμές/mm (ή 1000 γραμμές/mm)



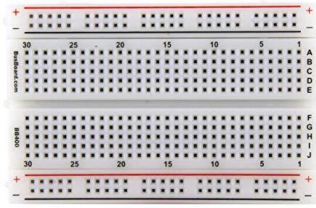
- 1 πέτασμα αριθμημένο.
- 1 μπαταρία 9 V



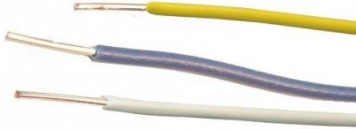
- 1 αντιστάτη 1kΩ (1000Ω, καφέ-μαύρο-κόκκινο)



- 1 breadboard (μικρή)



- 3 καλώδια μονόκλιωνα για breadboard

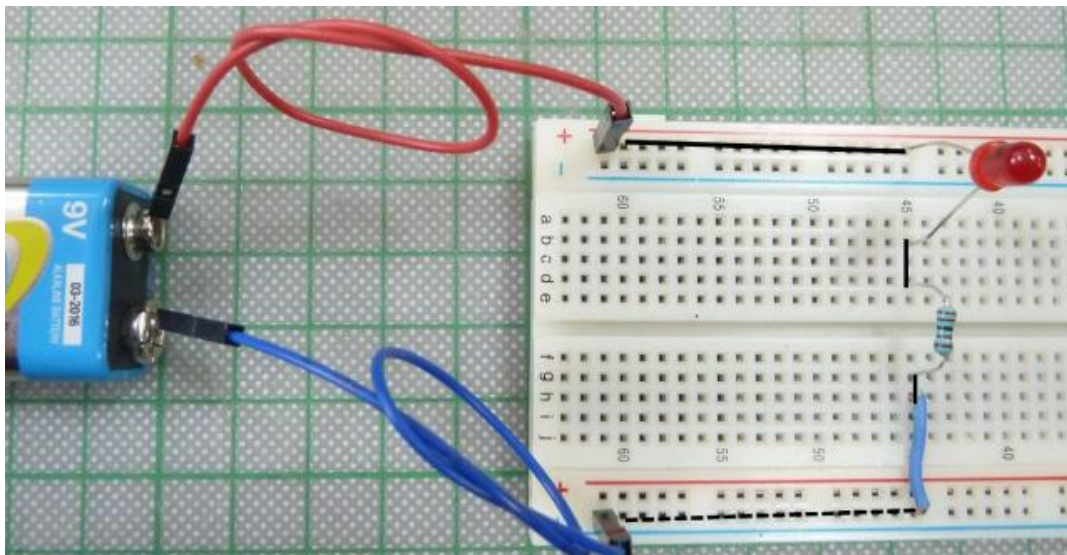


- 1 γεννήτρια συνεχούς τάσης



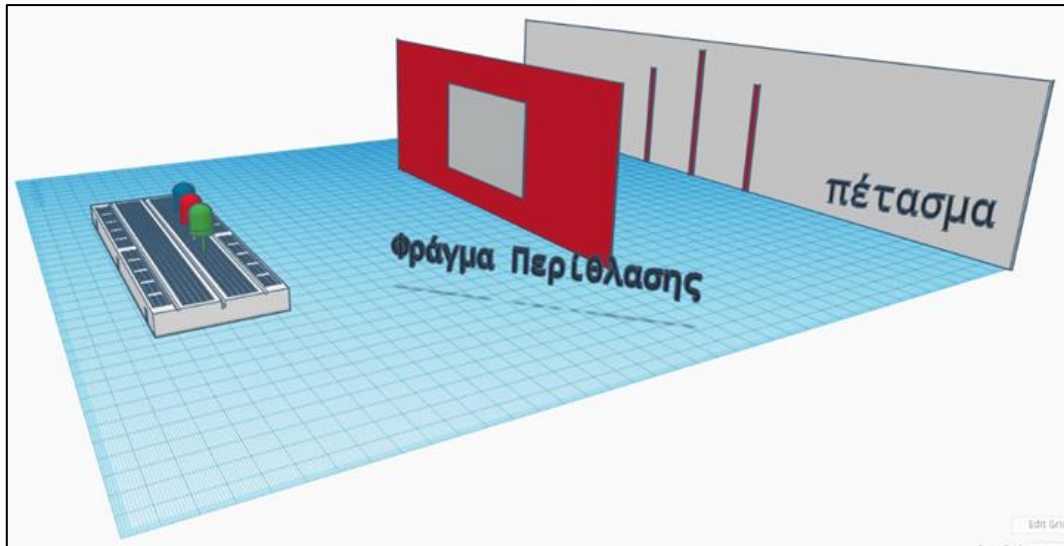
Οδηγίες κατασκευής πειραματικής διάταξης

Κατασκευάζουμε το ηλεκτρικό κύκλωμα για τα led σύμφωνα με την **Εικόνα 43**.



Εικόνα 43. Ηλεκτρικό κύκλωμα για τα led διαφορετικών χρωμάτων. Οι μαύρες γραμμές καταδεικνύουν πως συνδέονται μέσω της breadboard τα διάφορα ηλεκτρονικά εξαρτήματα.

Στη συνέχεια κατασκευάζουμε την πειραματική διάταξη σύμφωνα με την Εικόνα 44.



Εικόνα 44. Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης μέτρησης της σταθεράς του Planck

Πειραματικό μέρος

Ο τύπος από τον οποίον θα υπολογίσουμε τη σταθερά του Planck είναι:

$$E_{ph} = h \cdot f$$

και συνδέει την ενέργεια ενός φωτονίου με τη συχνότητά του. Το E είναι η ενέργεια του εκπεμπόμενου φωτονίου, f η συχνότητά του και h η σταθερά του Planck, την οποία και θα υπολογίσουμε. Η πειραματική διαδικασία, θα χωριστεί σε δύο βασικά μέρη : Στο Πρώτο μέρος θα υπολογίσουμε την Ενέργεια ενός εκπεμπόμενου φωτονίου από τα LED και στο Δεύτερο μέρος τη συχνότητα του αντίστοιχου φωτονίου. Τέλος, θα αντικαταστήσουμε τα αποτελέσματά μας στην εξίσωση $E = h \cdot f$ και θα υπολογίσουμε την σταθερά του Planck h .

Πρώτος μέρος

Για να υπολογίσουμε, αρχικά, την Ενέργεια ενός εκπεμπόμενου φωτονίου, θα χρησιμοποιήσουμε τα διαθέσιμα LED λαμπάκια μας από τα οποία θα μετρήσουμε την τάση κατωφλίου (V_{th}), την ελάχιστη δηλαδή τάση που χρειάζεται να παρέχουμε στο LED έτσι ώστε αυτό να φωτοβολήσει. Για να το επιτύχουμε αυτό, συνδέουμε ένα LED με τη γεννήτρια συνεχούς τάσης και ξεκινώντας από χαμηλές τιμές της τάσης όπου το LED ακόμα δεν φωτοβολεί, την αυξάνουμε σταδιακά έως ότου παρατηρήσουμε έστω και ελάχιστα το λαμπάκι να φωτοβολεί. Η τιμή που γράφει η γεννήτρια είναι η ζητούμενη V_{th} . Αφού επαναλάβουμε τη διαδικασία για όλα τα διαθέσιμα LED (κόκκινο, πράσινο, μπλε, λευκό) καταγράφουμε όλες τις V_{th} στον Πίνακα 2.

Από τη V_{th} που μόλις μετρήσαμε για τα διαφορετικά χρώματα LED, μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια του κάθε φωτονίου, σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$E_{ph} = V_t \cdot e$$

Όπου e είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου με τιμή :

$$e = 1.602176565(35) \times 10^{-19} \text{ Cb}$$

Έτσι, συμπληρώνουμε στον Πίνακα 2:

Πίνακας 2

LED	Τάση κατωφλίου V_{th} (Volt)	Ενέργεια φωτονίου E_{ph} ($V \cdot Cb$)
Κόκκινο		
Πράσινο		
Μπλε		
Λευκό		

Η ενέργεια εκπεμπόμενου φωτονίου που υπολογίσαμε, E_{ph} , είναι αυτή που υπεισέρχεται στην εξίσωση $E_{ph} = h \cdot f$ για τον υπολογισμό της σταθεράς Planck. Εφόσον εμείς έχουμε ενέργειες για φωτόνια τριών διαφορετικών χρωμάτων, θα εξάγουμε και τρεις διαφορετικές τιμές για τη σταθερά του Planck, τις οποίες θα συγκρίνουμε μεταξύ τους.

Δεύτερο μέρος

Πλέον, αρκεί να υπολογίσουμε τη συχνότητα του κάθε LED έτσι ώστε να αντικαταστήσουμε στην $E_{ph} = h \cdot f$ μαζί με την αντίστοιχη E_{ph} για κάθε LED διαφορετικού χρώματος. Για να βρούμε τη συχνότητα, θα πρέπει αρχικά να υπολογίσουμε το αντίστοιχο μήκος κύματος. Για το λόγο αυτό όπως φαίνεται και από την πειραματική μας διάταξη, χρησιμοποιούμε ένα φράγμα περίθλασης μέσα από το οποίο το φως διέρχεται και σχηματίζει κροσσούς όπως φαίνεται στην Εικόνα 45.



Εικόνα 45. Κροσσοί συμβολής, όπως προκύπτουν από πράσινο LED πάνω σε φράγμα περίθλασης. Στο κέντρο διακρίνεται ο κροσσός συμβολής μηδενικής τάξης ($m = 0$) και εκατέρωθεν αυτού ο κροσσοί συμβολής πρώτης τάξης ($m=1$).

Το μήκος κύματος λ , μπορούμε να το υπολογίσουμε σύμφωνα με την σχέση

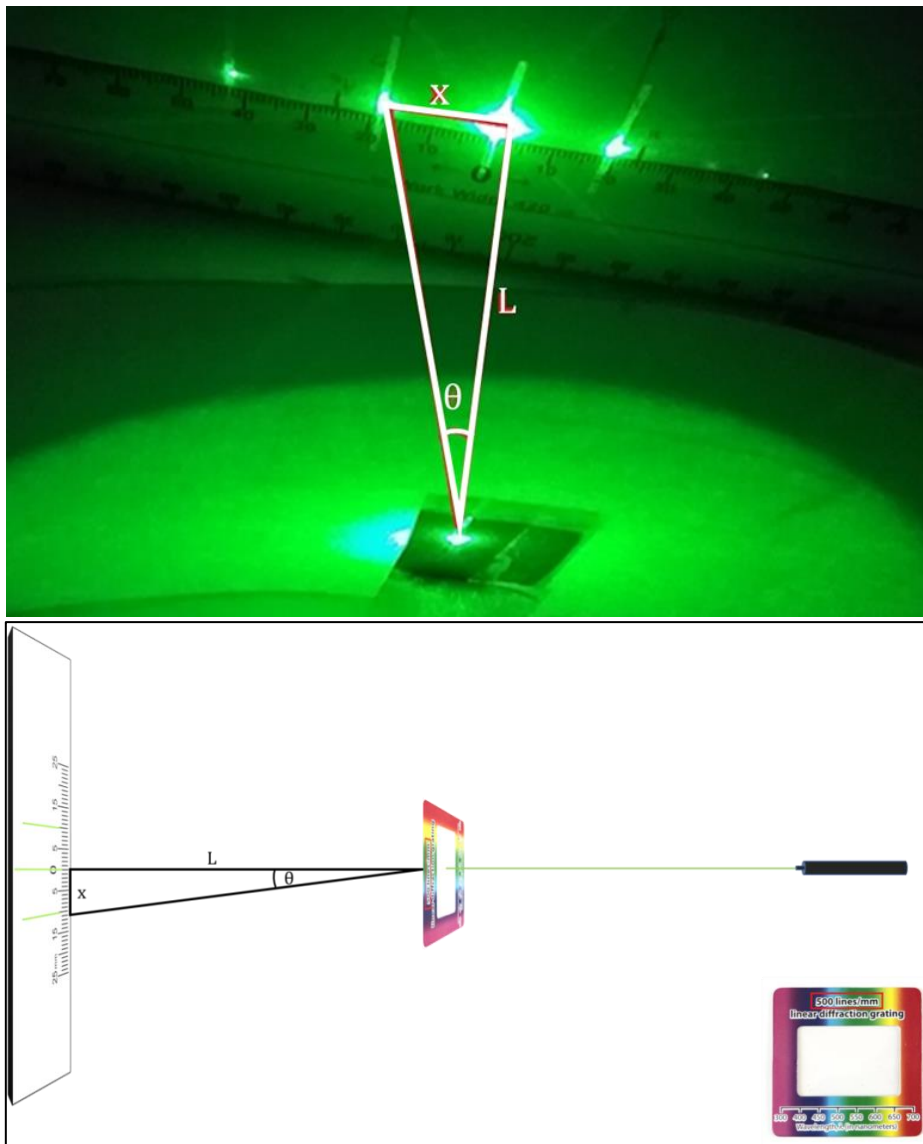
$$d \sin \theta = m \cdot \lambda$$

Όπου d^1 είναι η απόσταση δύο διαδοχικών σχισμών στο φράγμα περίθλασης και m είναι ο κροσσός συμβολής που εξετάζουμε ($m=1$ για τον πρώτο, 2 για τον δεύτερο κ.ο.κ.).

Από την παραπάνω σχέση όμως, για να βρούμε το λ , μας λείπει η γωνία θ . Αυτή προκύπτει τριγωνομετρικά σύμφωνα με τη σχέση:

$$\theta = \arctan(x/L)$$

όπου x είναι η απόσταση του κροσσού μηδενικής τάξης (κεντρικός κροσσός) από τον κροσσό που μελετάμε (συνήθως ο πρώτος, άρα $m=1$) και L η απόσταση του φράγματος περίθλασης από το πέτασμα όπου πέφτει τελικά το φως από το LED. Σχηματικά, τα παραπάνω μεγέθη φαίνονται στην Εικόνα 46.



Εικόνα 46. Γεωμετρικά μεγέθη τα οποία υπεισέρχονται στον υπολογισμό της σταθεράς του Planck.

¹ Η απόσταση d υπολογίζεται από το φράγμα περίθλασης και είναι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σχισμών. Για φράγμα με 500 lines/mm είναι: $d = 2 \cdot 10^{-6} m$.

Παρατήρηση: Κατά τη διάρκεια του εργαστηρίου η απόσταση του φράγματος περίθλασης από το πέτασμα αλλά και η απόσταση του κάθε LED από το φράγμα περίθλασης πρέπει να παραμένει σταθερή, ειδικά θα έχουμε μεγάλες αποκλίσεις στα αποτελέσματά μας.

Η παραπάνω διαδικασία συνοψίζεται στα εξής βήματα :

- 1) Αρχικά τοποθετούμε το LED πίσω από το φράγμα περίθλασης και δίνουμε τάση από το τροφοδοτικό, τέτοια ώστε στο πέτασμα να μπορούμε να διακρίνουμε μέχρι ΚΑΙ τον πρώτο κροσσό συμβολής. Η θέση όπου τοποθετήσαμε το LED, το φράγμα και το πέτασμα καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος δε θα μετακινηθούν.
- 2) Σημειώνουμε την απόσταση x (απόσταση μηδενικού κροσσού από τον πρώτο κροσσό συμβολής)
- 3) Σημειώνουμε το L (η απόσταση του φράγματος περίθλασης από το πέτασμα)
- 4) Σύμφωνα με την (4) υπολογίζουμε την αντίστοιχη γωνία θ
- 5) Σύμφωνα με την (3) (όπου $m = 1$) υπολογίζουμε το μήκος κύματος του αντίστοιχου χρώματος LED.

Επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία για κάθε χρώμα LED που διαθέτουμε. Στις Εικόνες 47, 48, 49 φαίνονται οι κροσσοί συμβολής που προκύπτουν από την περίθλαση διαφορετικών LED.



Εικόνα 47. Οι κροσσοί συμβολής που προκύπτουν από κόκκινο LED.

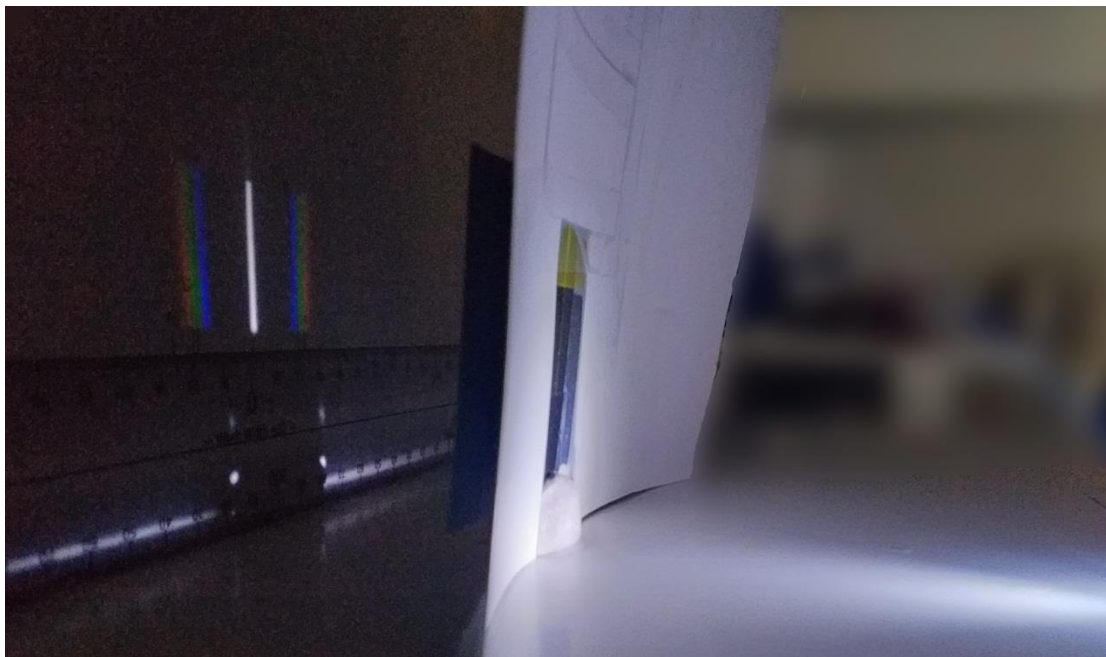


Εικόνα 48. Οι κροσσοί συμβολής που προκύπτουν από πράσινο LED.



Εικόνα 49. Οι κροσσοί συμβολής που προκύπτουν από μπλε LED.

Για τεστ ελέγχου, αφού σημειώσαμε πάνω στο πέτασμα τις θέσεις των κροσσών για κάθε χρωματιστό LED, χρησιμοποιήσαμε ένα λευκό LED και σημειώνουμε και πάλι τις θέσεις των κροσσών που προκύπτουν για κάθε διαφορετικό χρώμα, ελέγχοντας την απόκλιση τους (βλέπε Εικόνα 50).



Εικόνα 50. Οι κροσσοί συμβολής που προκύπτουν από λευκό LED.

Στη συνέχεια, συγκεντρώνουμε τα αποτελέσματά μας, στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3.

LED	Απόσταση x (m)	Γωνία θ	Μήκος κύματος λ (m)
Κόκκινο			
Πράσινο			
Μπλε			

Πλέον, για κάθε διαφορετικό χρώμα LED έχουμε την αντίστοιχη ενέργεια του φωτονίου που παράγεται και το μήκος κύματος του, άρα και τη συχνότητα. Από την $E_{ph} = h \cdot f$ λοιπόν μπορούμε να βρούμε τη σταθερά του Planck λύνοντας ως προς h , για κάθε σειρά μετρήσεων και να τις συγκρίνουμε μεταξύ τους, αλλά και με την παγκόσμια τιμή της σταθεράς που βρίσκουμε στη βιβλιογραφία.

2.11. Περίθλαση ηλεκτρονίων

Το 1924 ο Luis de Broglie έθεσε το ερώτημα: *Αν το φως μπορεί να έχει σωματιδιακές ιδιότητες γιατί τα σωμάτια να μην μπορούν να έχουν κυματικές ιδιότητες;* Η απάντηση που έδωσε αποτέλεσε το θέμα της διδακτορικής του διατριβής και αργότερα του απέφερε το βραβείο Νόμπελ Φυσικής. Σύμφωνα με τον de Broglie κάθε υλικό σωματίο έχει κυματικές ιδιότητες και υπό τις κατάλληλες συνθήκες, κάθε σωματίο μπορεί να παράγει μοτίβα συμβολής ή περίθλασης.

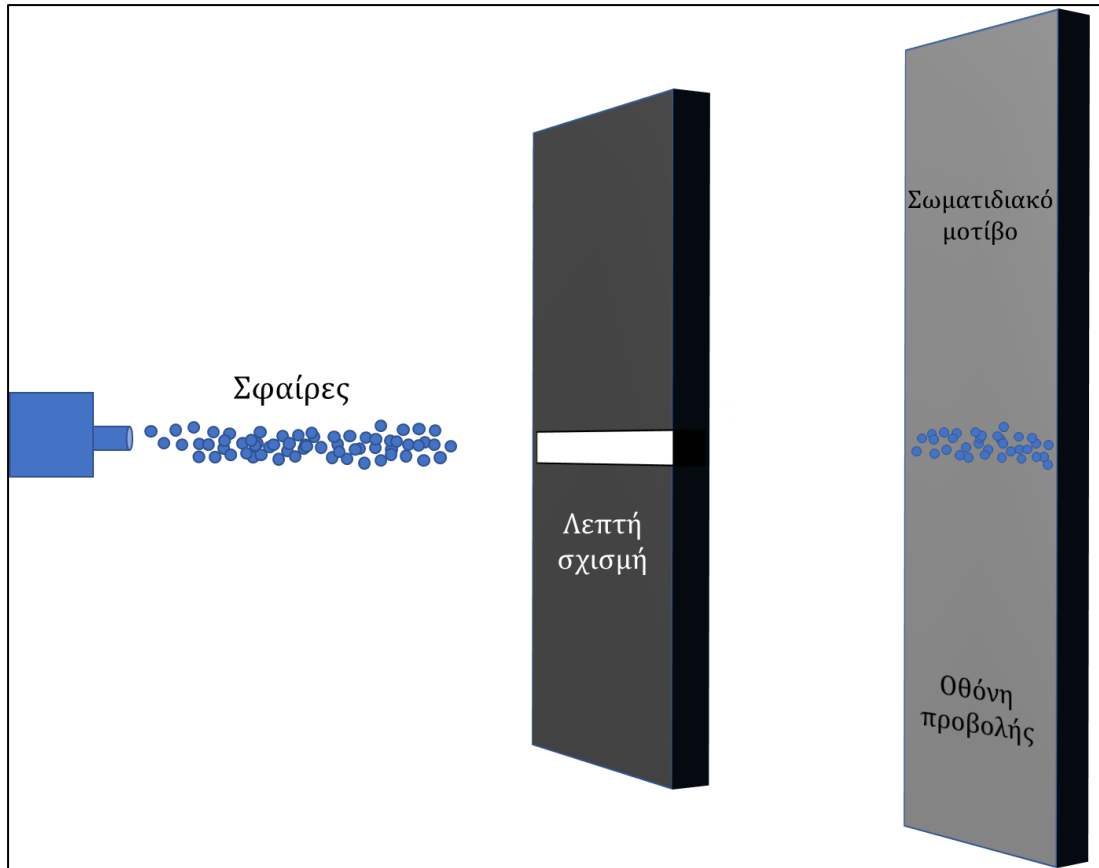
Η πειραματική επαλήθευση της φύσης του ηλεκτρονίου ως κύματος έγινε το 1926 από τους Αμερικάνους φυσικούς Clindon Davisson και Lester Germer. Στο πείραμά τους οι Davisson & Germer έστειλαν μια δέσμη ηλεκτρονίων να προσκρούσει σε έναν κρύσταλλο νικελίου. Μετά την πρόσπτωσή τους τα ηλεκτρόνια επέδειξαν ένα μοτίβο περίθλασης γεγονός που καταδείκνυε ότι τα ηλεκτρόνια έχουν κυματική συμπεριφορά.

2.11.1. Νοητικό πείραμα: Περίθλαση ηλεκτρονίων από διπλή σχισμή

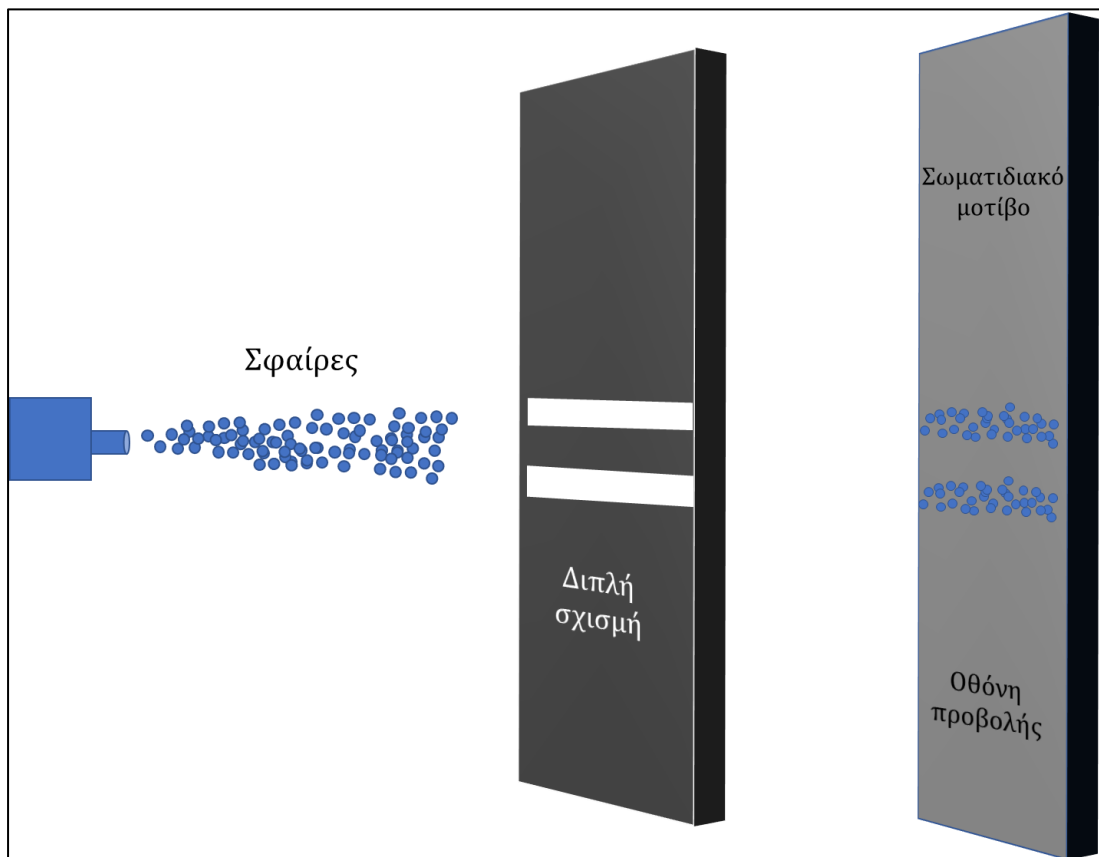
Αρχικά το διάσημο αυτό πείραμα προτάθηκε θεωρητικά από τον Richard Feynman ο οποίος το χρησιμοποιούσε ως νοητικό πείραμα στις διαλέξεις του. Για πρώτη φορά το πείραμα της διπλής σχισμής με δέσμη ηλεκτρονίων πραγματοποιήθηκε το 1961 από τον Claus Jönsson of Tübingen (*Zeitschrift für Physik* 161 454). Το πείραμα βελτιώθηκε και πραγματοποιήθηκε ξανά από τον Akira Tonomura και τους συνεργάτες του στην Hitachi το 1989 (*American Journal of Physics* 57 117-120). Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι το πείραμα της διπλής σχισμής έχει πραγματοποιηθεί και με νετρόνια, άτομα ακόμη και μόρια όπως ο C-60 και C-70 (Nairz Olaf et al. 2003, *American Journal of Physics* 71, 1084).

Το πείραμα

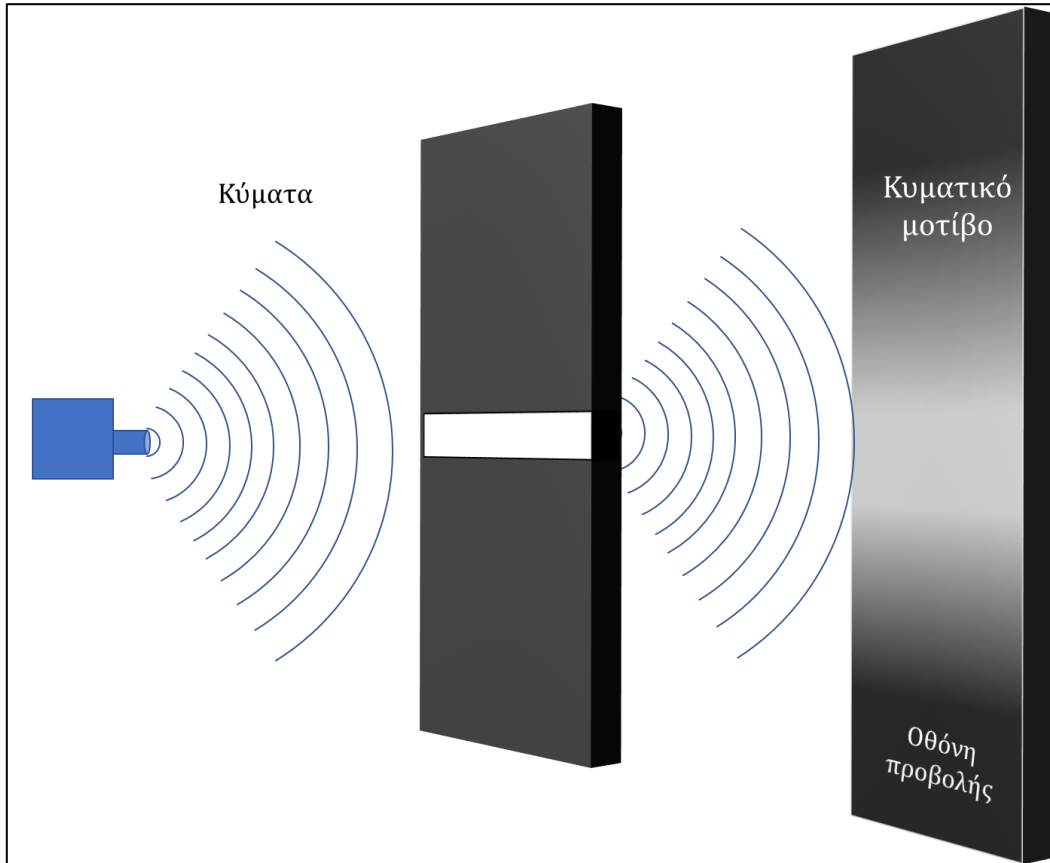
1. Ρωτάμε τους μαθητές/τριες τι πιστεύουν ότι θα παρατηρήσουμε σε μια οθόνη πίσω από μια λεπτή σχισμή αν στην σχισμή ρίξουμε σφαίρες. Αφού οι μαθητές/τριες δώσουν τις απαντήσεις τους, τους δείχνουμε το αποτέλεσμα του πειράματος το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 51.
2. Ρωτάμε τους μαθητές/τριες τι πιστεύουν ότι θα παρατηρήσουμε σε μια οθόνη πίσω από μια διπλή σχισμή αν στην διπλή σχισμή ρίξουμε σφαίρες. Αφού οι μαθητές/τριες δώσουν τις απαντήσεις τους, τους δείχνουμε το αποτέλεσμα του πειράματος το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 52.
3. Ρωτάμε τους μαθητές/τριες τι πιστεύουν ότι θα παρατηρήσουμε σε μια οθόνη πίσω από μια λεπτή σχισμή αν στην σχισμή ρίξουμε κύματα. Αφού οι μαθητές/τριες δώσουν τις απαντήσεις τους, τους δείχνουμε το αποτέλεσμα του πειράματος το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 53.
4. Ρωτάμε τους μαθητές/τριες τι πιστεύουν ότι θα παρατηρήσουμε σε μια οθόνη πίσω από μια διπλή σχισμή αν στην σχισμή ρίξουμε κύματα. Αφού οι μαθητές/τριες δώσουν τις απαντήσεις τους, τους δείχνουμε το αποτέλεσμα του πειράματος το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 54.



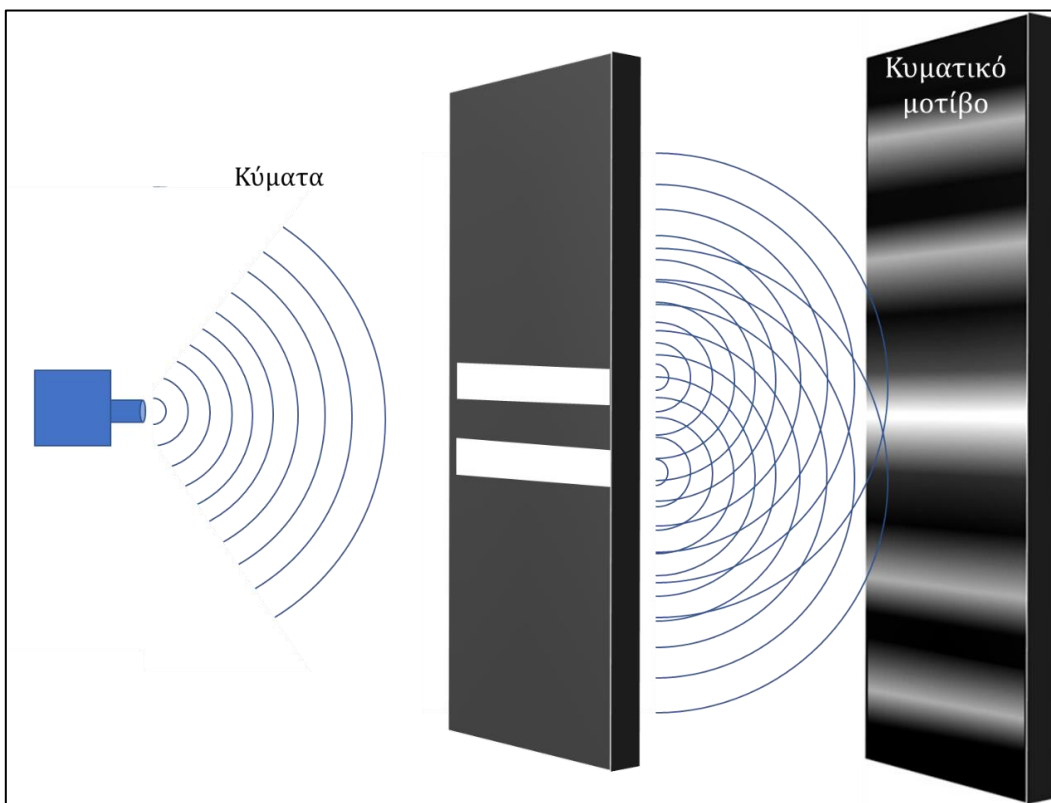
Εικόνα 51



Εικόνα 52



Εικόνα 53



Εικόνα 54

5. Ρωτάμε τους μαθητές/τριες τι πιστεύουν ότι θα παρατηρήσουμε σε μια οθόνη πίσω από μια μονή σχισμή, αν στην σχισμή προσπίπτει δέσμη ηλεκτρονίων. Αφού οι μαθητές/τριες δώσουν τις απαντήσεις τους, τους δείχνουμε το αποτέλεσμα του πειράματος το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 55.
6. Ρωτάμε τους μαθητές/τριες τι πιστεύουν ότι θα παρατηρήσουμε σε μια οθόνη πίσω από μια διπλή σχισμή, αν στην σχισμή προσπίπτει δέσμη ηλεκτρονίων. Αφού οι μαθητές/τριες δώσουν τις απαντήσεις τους, τους δείχνουμε το αποτέλεσμα του πειράματος το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 56.

Το αποτέλεσμα του πειράματος είναι αναπάντεχο, καθώς μικρά «κομμάτια» ύλης όπως τα ηλεκτρόνια παράγουν ένα κυματικό μοτίβο. Οι φυσικοί προκειμένου να ερμηνεύσουν αυτό το αποτέλεσμα σκέφτηκαν πως τα ηλεκτρόνια αφού περάσουν από την διπλή σχισμή αναπηδούν το ένα πάνω στο άλλο με αποτέλεσμα να σκεδάζονται σε διαφορετικές γωνίες και έτσι να δημιουργούν το μοτίβο συμβολής. Προκειμένου να ελέγξουν αυτό το ενδεχόμενο αποφάσισαν να πραγματοποιήσουν το ίδιο πείραμα αλλά αυτή τη φορά όχι με δέσμη ηλεκτρονίων αλλά στέλνοντας ένα ηλεκτρόνιο τη φορά. Με τον τρόπο αυτό θα απέκλειαν την αλληλεπίδραση μεταξύ των ηλεκτρονίων στην οποία πιθανότατα οφείλονταν το κυματικό μοτίβο.

7. Ρωτάμε τους μαθητές/τριες τι πιστεύουν ότι θα παρατηρήσουμε σε μια οθόνη πίσω από μια διπλή σχισμή, αν στην σχισμή προσπίπτουν ηλεκτρόνια με ρυθμό $1e/sec$. Αφού οι μαθητές/τριες δώσουν τις απαντήσεις τους, τους δείχνουμε το αποτέλεσμα του πειράματος το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 57.

Έπειτα από πολλές ώρες αναμονής οι επιστήμονες παρατήρησαν το ίδιο μοτίβο συμβολής! Το συμπέρασμα ήταν αναπόφευκτο. Τα ηλεκτρόνια φεύγουν από την πηγή ως σωματίδια αλλά όταν περνάνε μέσα από τις σχισμές συμπεριφέρονται ως κύματα. Όμως τι είδους κύματα;

Από μαθηματικής άποψης τα πράγματα είναι ακόμη πιο περίεργα: Το ηλεκτρόνιο περνά

- Μέσα και από τις δύο σχισμές και
- Μέσα από την αριστερή σχισμή μόνο και
- Μέσα από την δεξιά σχισμή μόνο και
- Μέσα από καμία σχισμή

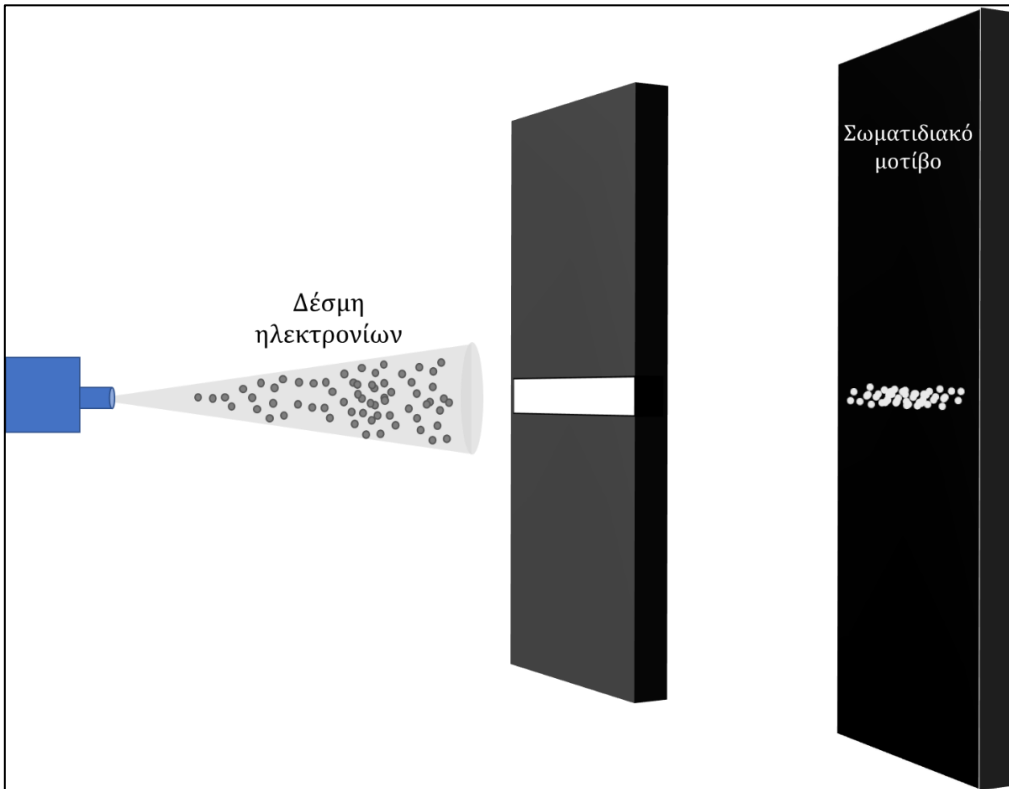
Όλες αυτές οι πιθανότητες συμβαίνουν ταυτόχρονα ή όπως λέμε βρίσκονται σε υπέρθεση μεταξύ τους.

Οι επιστήμονες ήταν τόσο συγχυσμένοι με το αποτέλεσμα του πειράματος που αποφάσισαν να κρυφοκοιτάξουν ώστε να διαπιστώσουν από ποια σχισμή περνά το κάθε ηλεκτρόνιο. Έτσι, τοποθέτησαν έναν ανιχνευτή δίπλα από τη μία σχισμή. Αν το σωματίδιο περνούσε μέσα αυτή ο ανιχνευτής θα το κατέγραφε. Αν όχι, θα σήμαινε πως το ηλεκτρόνιο πέρασε από την άλλη σχισμή.

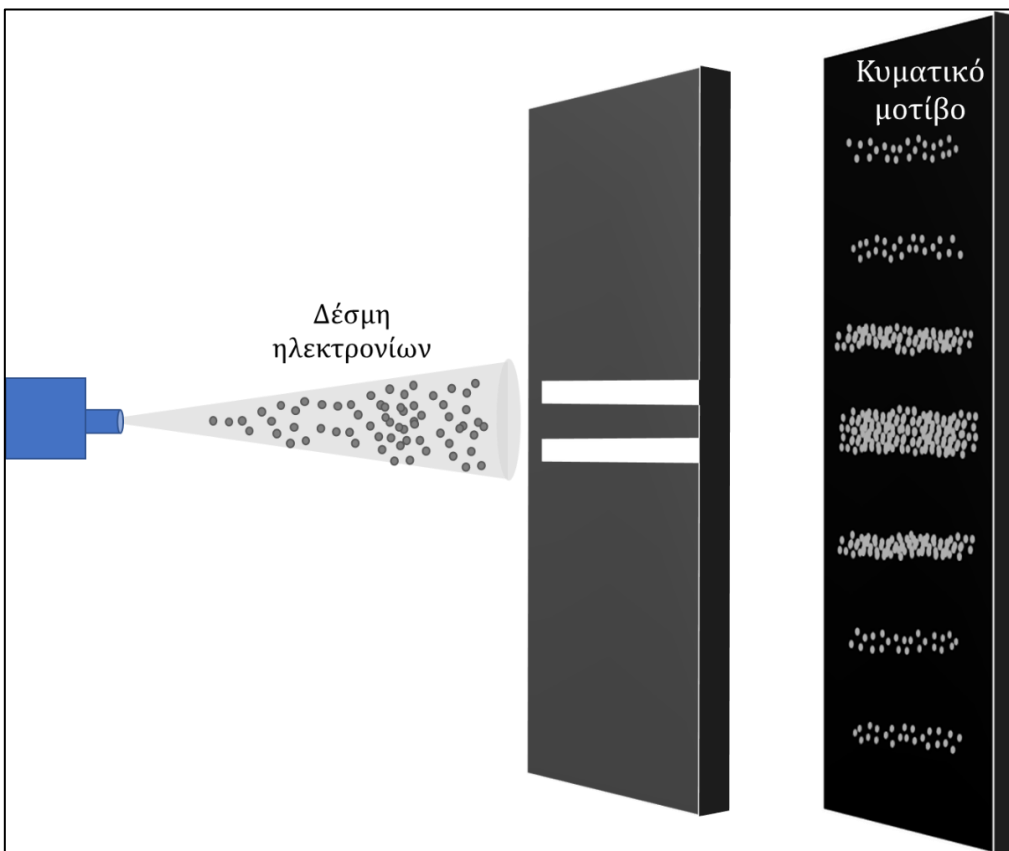
8. Ρωτάμε τους μαθητές/τριες τι πιστεύουν ότι θα παρατηρήσουμε στην οθόνη πίσω από τη διπλή σχισμή, αφού έχει τοποθετηθεί ο ανιχνευτής. Αφού οι μαθητές/τριες δώσουν τις απαντήσεις τους, τους δείχνουμε το αποτέλεσμα του πειράματος το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 58.

Οι επιστήμονες παρατήρησαν την ανάδυση ενός σωματιδιακού μοτίβου. Τα ηλεκτρόνια συμπεριφέρθηκαν σαν σωματίδια παράγοντας ένα μοτίβο δύο ζωνών και όχι ένα μοτίβο συμβολής. Και μόνο η ενέργεια της μέτρησης ή της παρατήρησης από ποια σχισμή πέρασε το κάθε ηλεκτρόνιο είχε ως αποτέλεσμα αυτό να περάσει μόνο από μία σχισμή και όχι και από τις δύο. Ήταν σαν το ηλεκτρόνιο να

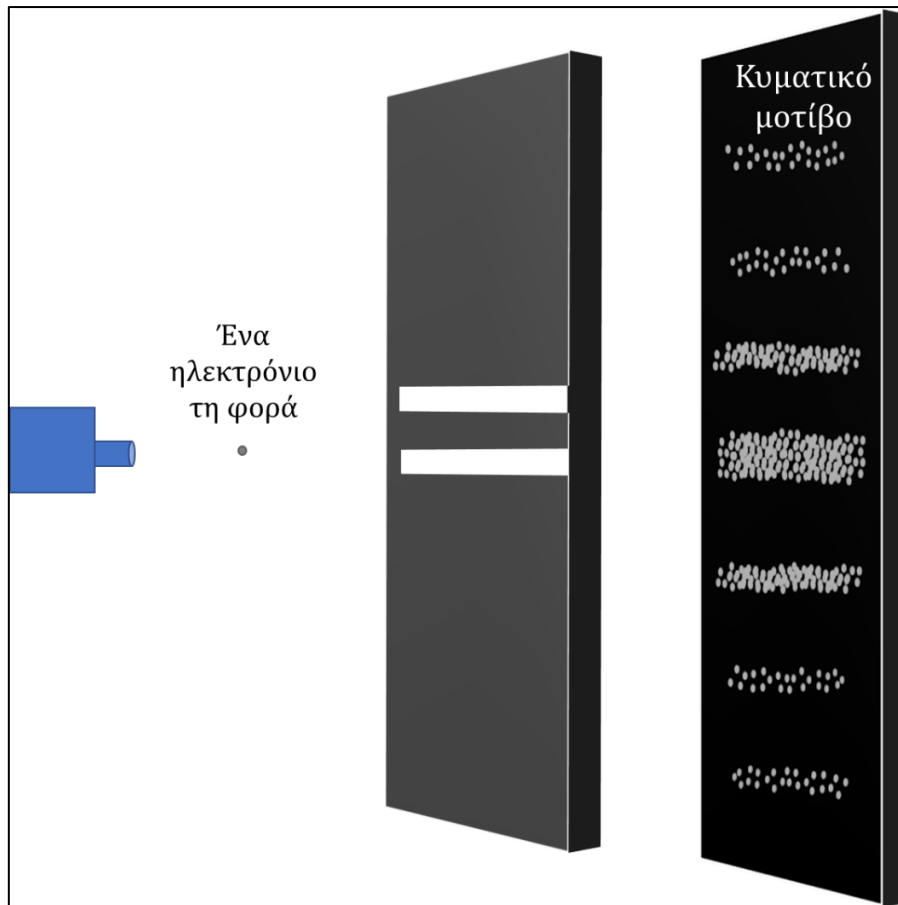
«αποφάσισε» να συμπεριφερθεί διαφορετικά «γνωρίζοντας» ότι υπόκειται σε παρατήρηση.



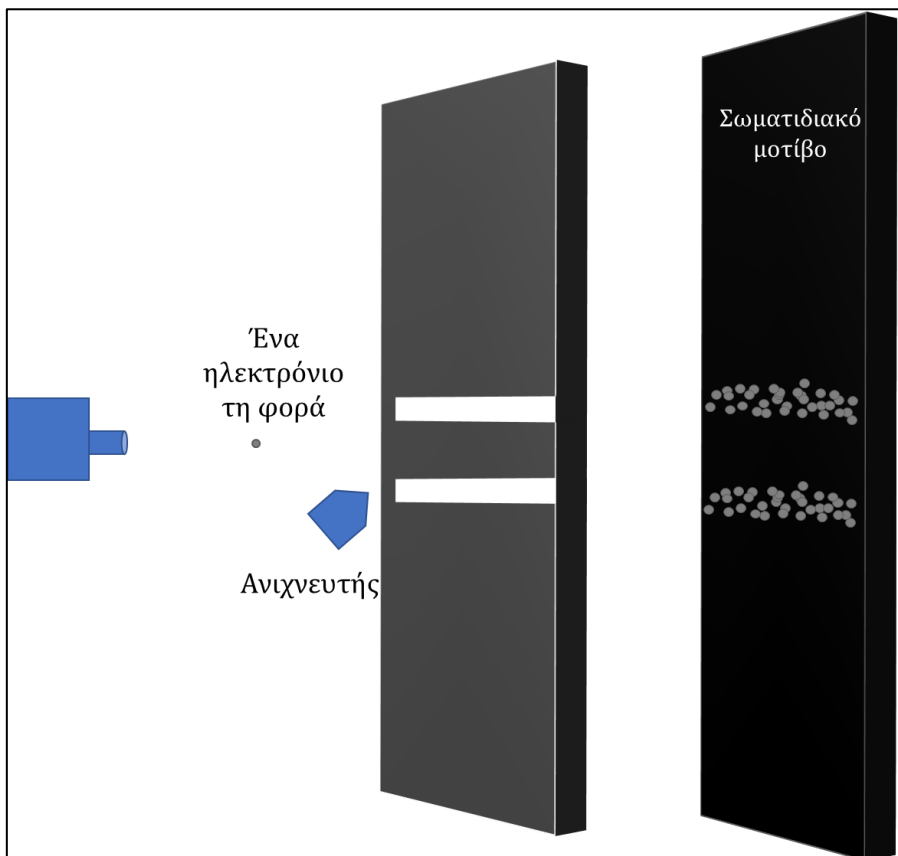
Εικόνα 55



Εικόνα 56



Εικόνα 57

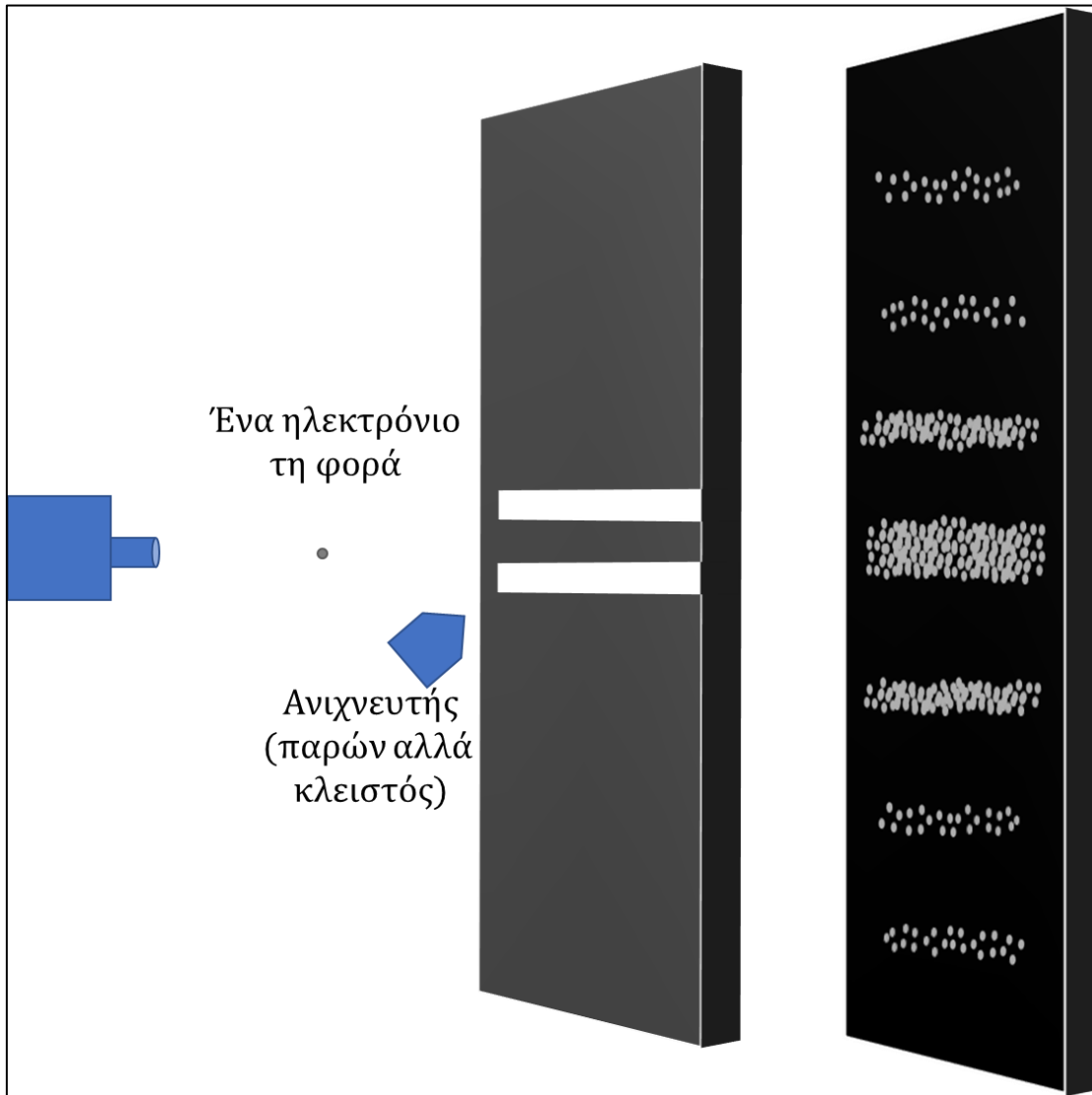


Εικόνα 58

9. Οι φυσικοί προχώρησαν ένα βήμα παραπέρα. Ας αφήσουμε τον ανιχνευτή στη θέση του αλλά ας τον βγάλουμε εκτός λειτουργίας. Ο λόγος; Να μην «γνωρίζουν» τα ηλεκτρόνια ότι δεν τα παρακολουθούμε. Εκτελούμε το πείραμα. Ποιο πιστεύετε ότι θα είναι το αποτέλεσμα;

Οι επιστήμονες παρατήρησαν ένα μοτίβο συμβολής (βλέπε Εικόνα 59), δηλαδή τα ηλεκτρόνια επιδείκνυαν κυματική συμπεριφορά.

Τα ερωτήματα που προέκυψαν ήταν αναπόφευκτα: Τι είναι η ύλη; Σωματίδια ή κύματα; Τι είδους κύματα; Ποια είναι η σχέση του παρατηρητή με όλα αυτά;

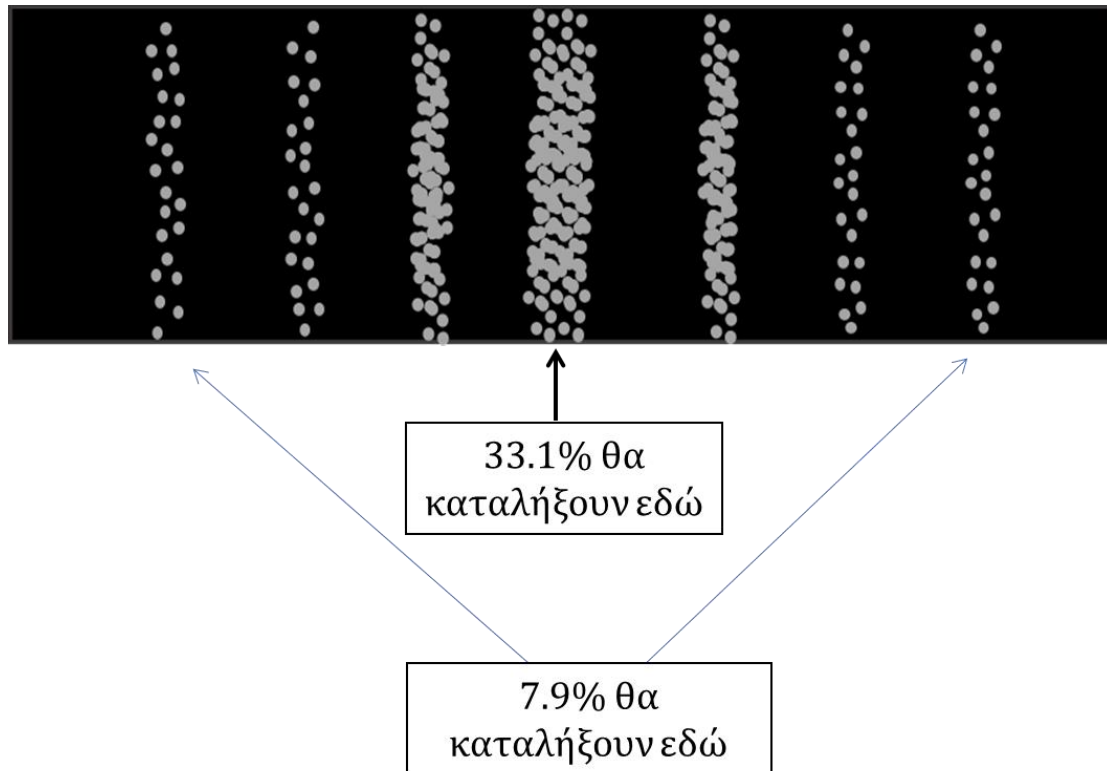


Εικόνα 59

Ο Max Born πρότεινε ότι αυτό το κύμα δεν αντιπροσωπεύει το ίδιο το ηλεκτρόνιο. Σε αντίθεση το κύμα είναι ένα κύμα πιθανοτήτων. Το μέγεθος του κύματος σε κάθε σημείο του χώρου παρέχει την πιθανότητα το ηλεκτρόνιο να βρεθεί σε αυτό το σημείο. Εκεί που το κύμα είναι μεγάλο, εκεί είναι και μεγαλύτερη η πιθανότητα να βρεθεί το ηλεκτρόνιο αν το παρατηρήσουμε. Δεν μας επιτρέπεται να ρωτάμε που βρίσκεται το ηλεκτρόνιο τώρα. Μας επιτρέπεται μόνο να ρωτάμε, αν αναζητήσουμε το ηλεκτρόνιο σε ένα συγκεκριμένο σημείο του χώρου ποια είναι η πιθανότητα να το βρούμε εκεί;

Σημειώνεται πως ο Erwin Schrodinger κατασκεύασε μια εξίσωση που περιγράφει αυτό το κύμα πιθανοτήτων η οποία είναι γνωστή ως εξίσωση Schrodinger.

Αν λοιπόν ρίξουμε ένα ηλεκτρόνιο σε μια οθόνη δεν μπορούμε να γνωρίζουμε σε ποιο σημείο της οθόνης θα καταλήξει το ηλεκτρόνιο. Εντούτοις, αν ρίξουμε πολλά ηλεκτρόνια τότε γνωρίζουμε με βεβαιότητα ότι το 33,1% των ηλεκτρονίων θα καταλήξουν στο κέντρο ενώ το 7,9% των ηλεκτρονίων θα καταλήξουν στα άκρα της οθόνης (βλέπε Εικόνα 60).



Εικόνα 60. Πιθανότητες εμφάνισης ηλεκτρονίων σε διαφορετικές περιοχές του πετάσματος πίσω από την διπλή σχισμή.

2.11.2. Ερμηνείες της κβαντικής μηχανικής

2.11.2.1. Η ερμηνεία της Κοπεγχάγης

Τα θεμέλια αυτής της ερμηνείας τέθηκαν από τους Niels Bohr και Werner Heisenberg μεταξύ 1925 και 1927. Σύμφωνα με την εν λόγω ερμηνεία, τα φυσικά συστήματα δεν χαρακτηρίζονται από καθορισμένες ιδιότητες προτού αυτές μετρηθούν. Η κβαντική μηχανική μπορεί μόνο να προβλέψει μόνο την κατανομή των πιθανοτήτων να προκύψουν συγκεκριμένα αποτελέσματα κατά την μέτρηση μιας ιδιότητας ενός φυσικού συστήματος. Η πράξη και μόνο της μέτρησης ενός φυσικού συστήματος επηρεάζει το ίδιο το σύστημα προκαλώντας την κατάρρευση του συνόλου των πιθανών αποτελεσμάτων σε ένα μόνο τελικό αποτέλεσμα ακριβώς μετά την μέτρηση.

Έτσι, σύμφωνα με την ερμηνεία της Κοπεγχάγης, παρατηρητής και το παρατηρούμενο σύστημα δεν μπορούν να θεωρηθούν ανεξάρτητα και ανεπηρέαστα μεταξύ τους. Η ίδια η πράξη της παρατήρησης επιδρά στο παρατηρούμενο σύστημα και επηρεάζει την κατάστασή του. Άρα, και τα αποτελέσματα των μετρήσεών μας. Ακόμα πιο πέρα, υποστηρίζουν ότι η κβαντική περιγραφή του μικρόκοσμου είναι πιθανοκρατική,

2.11.2.2. Τα πολλαπλά Σύμπαντα

Η ερμηνεία των πολλαπλών Συμπάντων (many worlds interpretation) προτάθηκε από τον Hugh Everett το 1957. Σύμφωνα με αυτή όλα τα πιθανά αποτελέσματα μιας κβαντικής μέτρησης λαμβάνουν χώρα συγχρόνως αλλά σε διαφορετικά Σύμπαντα και εμείς απλά παρατηρούμε το αποτέλεσμα της μέτρησης που λαμβάνει χώρα στο δικό μας Σύμπαν.

2.12. Η αρχή της απροσδιοριστίας του Heisenberg

Η διπλή φύση του φωτός και των σωματιδίων ενέπνευσε μια σειρά συζητήσεων μεταξύ των φυσικών σχετικά με τα όρια της ικανότητάς μας να μετράμε με ακρίβεια τις ιδιότητες πολύ μικρών αντικειμένων. Η συζήτηση επικεντρώνεται γύρω από την άποψη ότι η ίδια η πράξη της παρατήρησης/μέτρησης ενός μεγέθους επηρεάζει το παρατηρούμενο μέγεθος.

Όπως και στην κλασική φυσική υπεισέρχονται αβεβαιότητες κατά την μέτρηση ενός μεγέθους έτσι και στην κβαντική φυσική εμφανίζονται οι κβαντικές αβεβαιότητες οι οποίες είναι όμως διαφορετικής φύσεως. Οι κβαντικές αβεβαιότητες πηγάζουν από την κυματική φύση της ύλης και είναι σημαντικές σε ατομικό και υποατομικό επίπεδο.

Ένα ιδανικό κύμα χαρακτηρίζεται από μία συχνότητα και δεν είναι εντοπισμένο σε κάποιο σημείο του χώρου. Σε αντίθεση ένα ιδανικό σωματίδιο έχει μηδενικό μέγεθος. Άρα η ειδοποιός διαφορά μεταξύ ενός κύματος και ενός σωματιδίου είναι ότι το δεύτερο είναι εντοπισμένο στο χώρο. Το γεγονός ότι το κύμα δεν είναι εντοπισμένο στο χώρο προσδίδει μια αβεβαιότητα στις μετρήσεις μας σε κβαντικό επίπεδο.

Η αβεβαιότητα που εμφανίζεται στην μέτρηση μεγεθών σε ατομικό επίπεδο διατυπώθηκε μαθηματικά για πρώτη φορά από τον Γερμανό Φυσικό Werner Heisenberg (1901-1976) και καλείται αρχή της αβεβαιότητας ή αρχή της απροσδιοριστίας η οποία αποτελεί μια από τις θεμελιώδεις αρχές της κβαντικής μηχανικής.

Σύμφωνα με την αρχή της απροσδιοριστίας είναι αδύνατο να μετρηθεί ταυτόχρονα και με ακρίβεια, ούτε πρακτικά, ούτε και θεωρητικά η θέση και η ορμή, ενός σωματίου.

Η Αρχή της Απροσδιοριστίας του Heisenberg μπορεί να διατυπωθεί ως εξής: *Εάν η μέτρηση της θέσης ενός σωματίου έχει γίνει με αβεβαιότητα Δx και η ταυτόχρονη μέτρηση της ορμής του έχει γίνει με αβεβαιότητα Δp_x τότε, το γινόμενο των αβεβαιοτήτων δεν μπορεί να είναι μικρότερο από την τιμή του $h/4\pi$.*

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar/2$$

όπου

$$h/2\pi \equiv \hbar$$

Οι αναπόφευκτες αβεβαιότητες Δx και Δp_x δεν προέρχονται από ατέλειες των μετρητικών συσκευών αλλά από αυτή καθ' εαυτή την κβαντική συμπεριφορά της ύλης.

Η αρχή της απροσδιοριστίας διατυπώνεται και στην περίπτωση μέτρησης της ενέργειας E ενός συστήματος και θέτει ένα όριο στην ακρίβεια με την οποία μπορεί να μετρηθεί αυτή.

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$$

Η σχέση αυτή εκφράζει την αρχή της απροσδιοριστίας ενέργειας-χρόνου. Το Δt δεν εκφράζει αβεβαιότητα στη μέτρηση κάποιου χρονικού διαστήματος αλλά είναι το χρονικό διάστημα που πρέπει να περιμένουμε για να μετρήσουμε μια αισθητή μεταβολή στην ενέργεια του συστήματος με αβεβαιότητα ΔE . Όσο μεγαλύτερη ακρίβεια επιτυγχάνουμε στην μέτρηση της ενέργειας ενός φωτονίου, ηλεκτρονίου κ.τ.λ. τόσο μεγαλύτερη αβεβαιότητα έχουμε στο χρονικό διάστημα που περιμέναμε προκειμένου να μετρήσουμε αυτή την ενέργεια.

Αυτή η μορφή αβεβαιότητας εκφράζει το γεγονός ότι η διατήρηση της ενέργειας μπορεί να παραβιαστεί μόνο για ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα Δt το οποίο είναι συνεπές με την ανωτέρω εξίσωση.

2.13. Το φαινόμενο Casimir και το «γεμάτο» κενό

Τι θα γινόταν αν τοποθετούσαμε, στο κενό, σε $T=0$ K, δύο αφόρτιστες, αγωγίμες παράλληλες πλάκες, πολύ κοντά τη μία στην άλλη; Η λογική απάντηση είναι τίποτα.

Το 1948 ο Δανός φυσικός Hendrik Casimir προέβλεψε την εμφάνιση μιας ελκτικής δύναμης μεταξύ δύο αφόρτιστων, αγωγίμων παράλληλων, πλακών στο κενό σε $T=0$ K, τοποθετημένων σε πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους (10^{-6} m). Ο Casimir πρότεινε πως η εμφάνιση της ελκτικής δύναμης είναι απόρροια των κβαντικών διακυμάνσεων του κενού. Η θεωρητική πρόβλεψη του Casimir επιβεβαιώθηκε πειραματικά το 1997 από τον S. K. Lamoreaux.

Σύμφωνα με την κβαντική θεωρία πεδίου (Quantum Field Theory-QFT) όλα τα θεμελιώδη σωμάτια αποτελούν διακυμάνσεις-διαταραχές-ταλαντώσεις (κύματα) του αντίστοιχου πεδίου τους. Για παράδειγμα το φωτόνιο είναι μία διαταραχή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

Τι συμβαίνει όμως όταν σε ένα σημείο του χώρου δεν έχουμε κανένα σωμάτιο; Τι συμβαίνει στον κενό χώρο; Το πεδίο υπάρχει; Θα περίμενε κανείς ότι σε αυτή την περίπτωση τα πεδία είναι παρόντα και ήρεμα όπως ακριβώς η ήρεμη επιφάνεια μιας λίμνης όταν δεν φυσάει καθόλου αέρας ή κανείς δεν πετάει πέτρες για να προκαλέσει κυματισμούς στην επιφάνειά της.

Σε αντίθεση, τα πεδία δεν είναι ποτέ απολύτως «ήρεμα». Αν για παράδειγμα το H/M ήταν απόλυτα «ήρεμο» θα γνωρίζαμε ότι κάθε χρονική στιγμή η ενέργεια κάθε σημείου του είναι μηδέν. Δηλαδή θα γνωρίζαμε με απόλυτη βεβαιότητα την τιμή της ενέργειας ($E=0$) ενός κβαντικού πεδίου αλλά και του χρονικού διαστήματος για το οποίο έχει αυτή την ενέργεια. Αυτό όμως παραβιάζει την αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg $\Delta E \cdot \Delta t \geq h/4\pi$.

Συνεπώς, τα κβαντικά πεδία, όπως και το H/M ποτέ δεν χαρακτηρίζονται από μηδενική ενέργεια. Σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή η τιμή ενός σημείου του H/M πεδίου μεταβάλλεται γύρω από μία σταθερή μέση τιμή (διάφορη του μηδενός). Ακόμη και το απόλυτο κενό σε $T=0$ K εμφανίζει διακυμάνσεις στο H/M (και οποιοδήποτε άλλο πεδίο) η μέση ενέργεια του οποίου είναι μισή από την ενέργεια ενός φωτονίου. Οι διακυμάνσεις αυτές είναι γνωστές ως κβαντικές διακυμάνσεις του κενού.

Οι διακυμάνσεις των κβαντικών πεδίων, όπως το H/M , καλούνται καταχρηστικά εικονικά σωματίδια, υπό την έννοια ότι δεν είναι πραγματικά σωματίδια όπως το ηλεκτρόνιο ή το φωτόνιο.

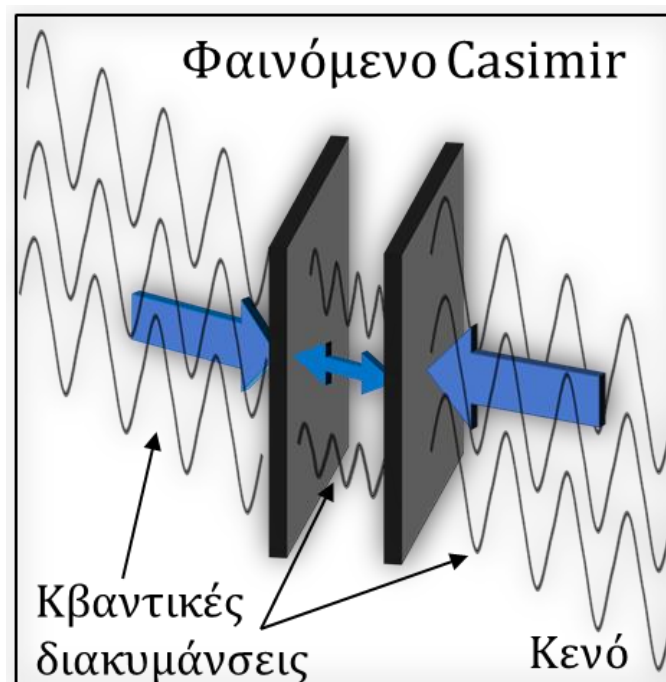
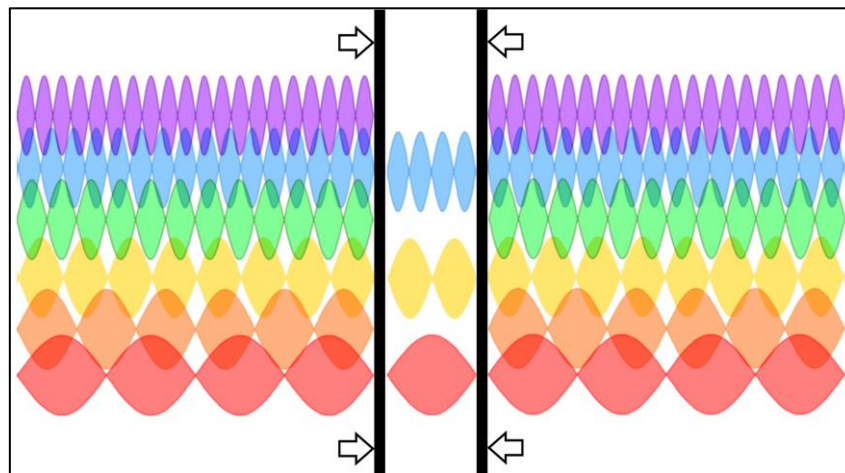
Έτσι, στο απόλυτο κενό εξαιτίας των κβαντικών διακυμάνσεων των πεδίων, κάνουν την εμφάνισή τους ζεύγη από σωμάτια και αντισωμάτια ο χρόνος ζωής των οποίων είναι απειροελάχιστος.

Μετά από αυτό το χρονικό διάστημα κάθε ζεύγος σωματίου-αντισωματίου εξαϋλώνεται και αυτά εξαφανίζονται.

2.13.1. Ερμηνεία του φαινομένου

Τοποθετώντας τις δύο αγωγίμες πλάκες στο κενό, χωρίζουμε τον χώρο σε δύο περιοχές. Στην περιοχή εκτός των πλακών και στην περιοχή μεταξύ αυτών. Στην περιοχή εκτός των πλακών, εξαιτίας των κβαντικών διακυμάνσεων εμφανίζονται διαταραχές στο

ηλεκτρομαγνητικό πεδίο όλων των δυνατών συχνοτήτων (εικονικά φωτόνια όλων των δυνατών μηκών κύματος) ή αλλιώς όλων των δυνατών τρόπων ταλάντωσης (βλέπε Εικόνα 61). Σε αντίθεση μεταξύ των πλακών είναι δυνατόν να αναπτυχθούν πολύ συγκεκριμένοι τρόποι ταλάντωσης (κύματα) οι οποίοι ικανοποιούν την εξής προϋπόθεση: το ακέραιο πολλαπλάσιο του μισού μήκους κύματος χωράει ακριβώς μεταξύ των πλακών. Όλοι οι άλλοι τρόποι ταλάντωσης δεν είναι επιτρεπτοί μεταξύ των πλακών (βλέπε Εικόνα 61). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση πολύ μεγαλύτερου αριθμού εικονικών σωματιδίων στην περιοχή εκτός των πλακών από ότι στην περιοχή εντός αυτών. Όμως τα εικονικά σωματίδια, τα οποία κινούνται με την ταχύτητα του φωτός, έχουν ορμή και συγκρουόμενα με τις πλάκες μεταφέρουν την ορμή τους σε αυτές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ασκείται πίεση στις πλάκες. Επειδή όμως ο αριθμός των εικονικών σωματιδίων είναι πολύ μεγαλύτερος εκτός των πλακών από τον αριθμό μεταξύ αυτών η πίεση εκτός των πλακών θα είναι μεγαλύτερη από την πίεση εντός των πλακών. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μιας δύναμης η οποία ωθεί τις πλάκες να έρθουν πιο κοντά η μία στην άλλη μέχρι να ενωθούν.



Εικόνα 61. Σχηματική αναπαράσταση του φαινομένου Casimir.

2.13.2. Μηχανικό ανάλογο του φαινομένου Casimir

Στην παράγραφο αυτή θα πραγματοποιηθεί ένα πείραμα επίδειξης το οποίο αποτελεί ένα μηχανικό ανάλογο του φαινομένου Casimir και αναδεικνύει τόσο την αρχή της απροσδιοριστίας του Heisenberg όσο και του γεγονότος ότι το κενό δεν είναι απολύτως άδειος χώρος.

2.13.2.1. Πειραματική διαδικασία

Υλικά

- Ένα ηχείο που μπορεί να παράγει χαμηλές συχνότητες (subwoofer)



- Δύο μεταλλικές πλάκες (χαλκός ή αλουμίνιο ή ατσάλι) διαστάσεων 80mm x 150mm x 3mm



- Κλωστή



- Ένα διάφανο κυλινδρικό δοχείο ύψους ~30 cm και διαμέτρου ~15 cm (ή μια πλαστική κανάτα)



- Έναν ενισχυτή ήχου



- Δύο ορθοστάτες



- Ράβδους ορθοστάτη



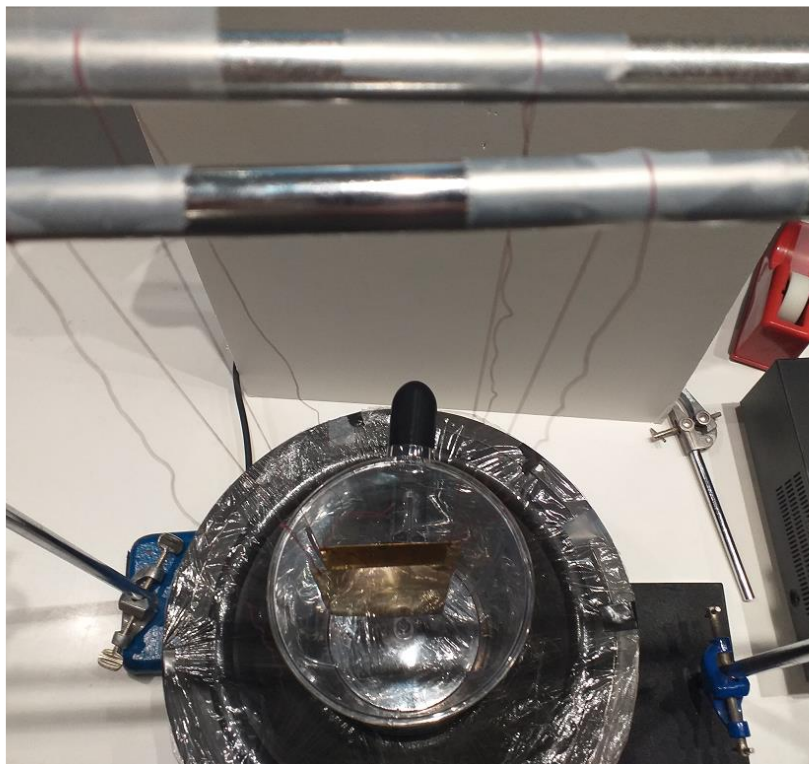
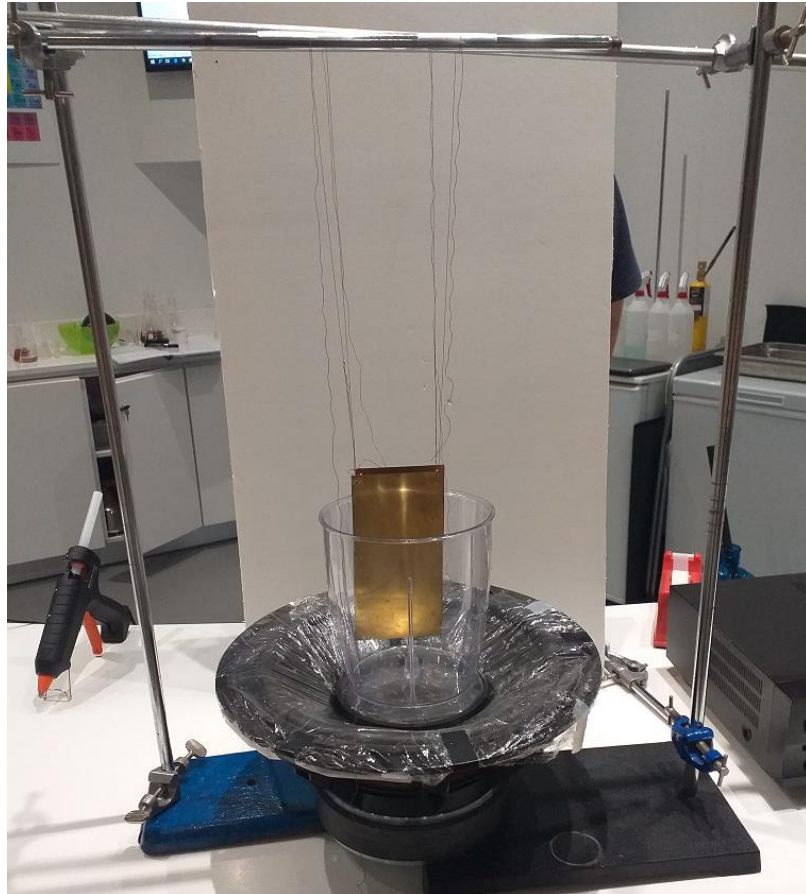
- Δύο μεταλλικούς συνδέσμους ορθοστάτη



Συνδέουμε το ηχείο με τον ενισχυτή και τον ενισχυτή με την έξοδο ακουστικών ενός υπολογιστή.

Κατασκευάζουμε τη διάταξη της Εικόνας 62 Στερεώνουμε τις πλάκες με τη βοήθεια της κλωστής στους ορθοστάτες. Η απόσταση μεταξύ των πλακών θα πρέπει να είναι $\sim 1,5$ cm. Γεμίζουμε το δοχείο με νερό μέχρι τα $2/3$ και βυθίζουμε τις πλάκες μέσα στο νερό τουλάχιστον μέχρι τη μέση.

Μέσω του υπολογιστή δίνουμε ένα ηχητικό σήμα σταθερής χαμηλής συχνότητας (η συχνότητα θα πρέπει να είναι μεταξύ 10-15Hz) και παρατηρούμε την κίνηση των μεταλλικών πλακών. Μετά από μερικά δευτερόλεπτα παρατηρούμε πως οι πλάκες έλκονται και κολλάνε μεταξύ τους. Αν κλείσουμε τον ήχο παρατηρούμε πως οι πλάκες μετά από μερικά δευτερόλεπτα επανέρχονται στην αρχική τους θέση.



Εικόνα 62. Πειραματική διάταξη επίδειξης του μηχανικού ανάλογου του φαινομένου Casimir.

3. Φύλλο αξιολόγησης

Ανάκλαση-διάθλαση

1. Τι παρατηρήσατε για την γωνία πρόσπτωσης και την γωνία ανάκλασης; Ποια είναι η μεταξύ τους σχέση;
2. Τι συμβαίνει όταν το φως διαδίδεται από ένα λιγότερο σε ένα περισσότερο πυκνό μέσο;
3. Τι συμβαίνει όταν το φως διαδίδεται από ένα περισσότερο σε ένα λιγότερο πυκνό μέσο;
4. Ποια είναι η σχέση μεταξύ της γωνίας πρόσπτωσης και της γωνίας διάθλασης;
5. Όταν το φως διαδίδεται από ένα μέσο σε ένα άλλο ποια ποσότητα παραμένει σταθερή;
 - i. Ενέργεια
 - ii. Συχνότητα
 - iii. Ταχύτητα
 - iv. Μήκος κύματος
6. Για ποιο λόγο όταν τοποθετήσουμε ένα κουτάλι μέσα σε ένα ποτήρι με νερό, βλέπουμε το κουτάλι να «κάμπτεται»;

Νεύτωνας

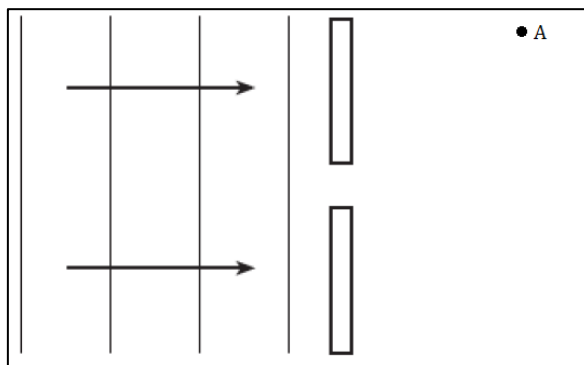
1. Το λευκό φως είναι απλό ή σύνθετο; Από ποια χρώματα αποτελείται;
2. Πως ερμηνεύεται η ανάλυση του λευκού φωτός; Ποιο φαινόμενο ευθύνεται;
3. Ποια είναι τα βασικά χρώματα;
4. Τι σημαίνει το RGB που εμφανίζεται στις ρυθμίσεις των συσκευών αναπαραγωγής εικόνας; Με πόσα χρώματα παράγεται το λευκό που παρατηρούμε στις οθόνες μας;

Grimaldi και περίθλασης

1. Στο πείραμα περίθλασης του Grimaldi τι παρατηρούμε στο πέτασμα πίσω από την τρύπα; Τι αποδεικνύεται με αυτό τον τρόπο;
2. Γιατί το φαινόμενο της περίθλασης από το λεπτό εμπόδιο καταδεικνύει ότι το φως έχει κυματική φύση;
3. Σημειώστε τρία παραδείγματα περίθλασης από την καθημερινή σας ζωή.

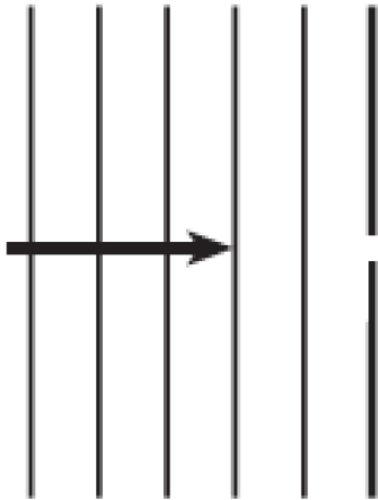
Huygens

1. Το διάγραμμα απεικονίζει μια σειρά επίπεδων κυμάτων τα οποία προσεγγίζουν το άνοιγμα μιας σχισμής. Το σημείο A βρίσκεται πίσω από την σχισμή.



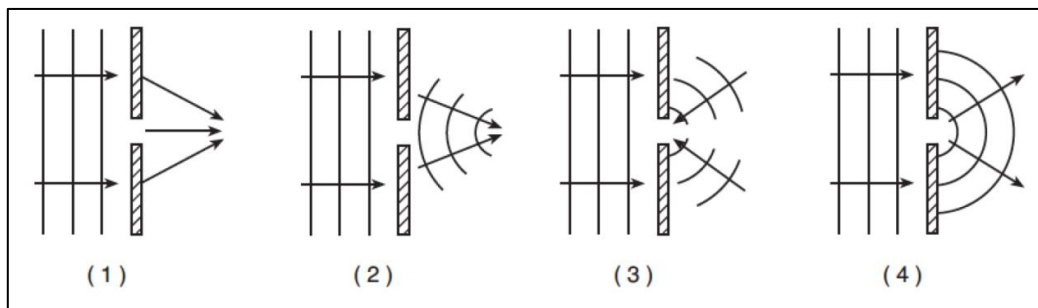
Τα μέτωπα κύματος φθάνουν στο σημείο Α εξαιτίας του φαινομένου

- i. Του συντονισμού
 - ii. Της διάθλασης
 - iii. Της ανάκλασης
 - iv. Της περίθλασης
2. Ένα κύμα σταθερού μήκους κύματος περιθλάται καθώς περνά μέσα από μια σχισμή. Καθώς το εύρος της σχισμής μικραίνει, το φαινόμενο της περίθλασης
 - i. Ενισχύεται
 - ii. Εξασθενεί
 - iii. Παραμένει το ίδιο
 3. Στο διάγραμμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται ένα επίπεδο κύμα το οποίο προσκρούει σε λεπτή σχισμή.



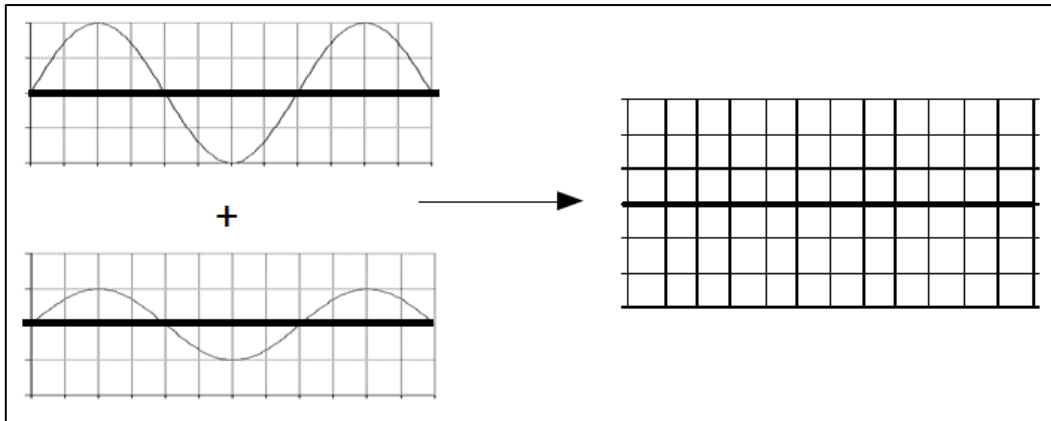
Σχεδιάστε τέσσερα μέτωπα κύματος αφού έχουν περάσει μέσα από την σχισμή.

4. Μπορείτε να αναφέρετε ένα παράδειγμα από την καθημερινότητα όπου παρατηρούμε παραγωγή σφαιρικών κυμάτων;
5. Εάν ένα σφαιρικό κύμα συναντήσει ένα εμπόδιο, το εμπόδιο θα παραγάγει (δευτερογενώς) επίπεδο ή σφαιρικό κύμα;
6. Ποιο από τα διαγράμματα που ακολουθούν αντιπροσωπεύει το σχήμα και την κατεύθυνση μετώπων κύματος αφού αυτά έχουν περάσει μέσα από μια λεπτή σχισμή;

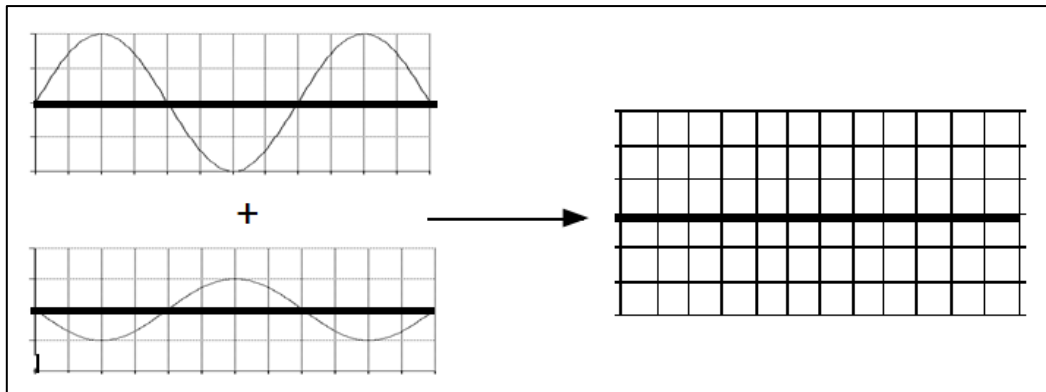


Το πείραμα της διπλής σχισμής του Young

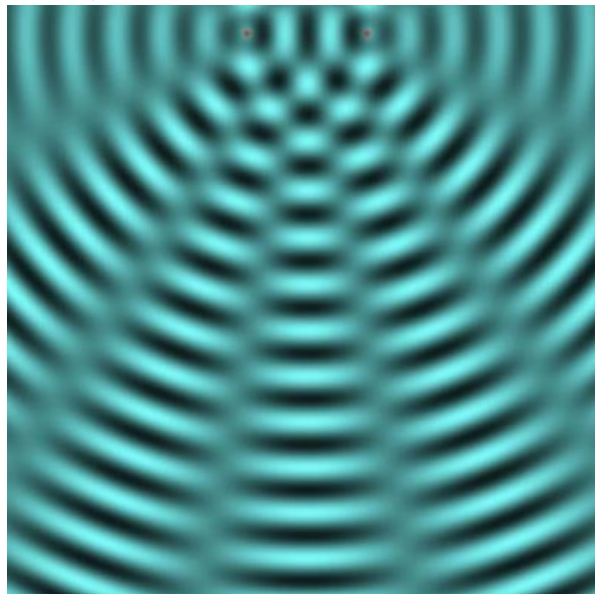
1. Ποιος είναι ο ρόλος της περίθλασης στο πείραμα της διπλής σχισμής του Young;
2. Στο παράδειγμα που ακολουθεί συνδυάστε τα δύο κύματα ώστε να δείξετε την ενισχυτική συμβολή.



3. Στο παράδειγμα που ακολουθεί συνδυάστε τα δύο κύματα ώστε να δείξετε την ενισχυτική συμβολή.



4. Στην πιο κάτω εικόνα σημειώστε τα σημεία στα οποία λαμβάνει χώρα ενισχυτική και καταστρεπτική συμβολή.



5. Αν το αποτέλεσμα συμβολής δύο σφαιρικών κυμάτων το προβάλλουμε σε ένα τοίχο (πέτασμα) τι μοτίβο θα πάρουμε; Πώς εξηγείται ;
6. Στο πείραμα της διπλής σχισμής του Young το αποτέλεσμα που παρατηρήσατε είναι αυτό που αναμένατε αρχικά;

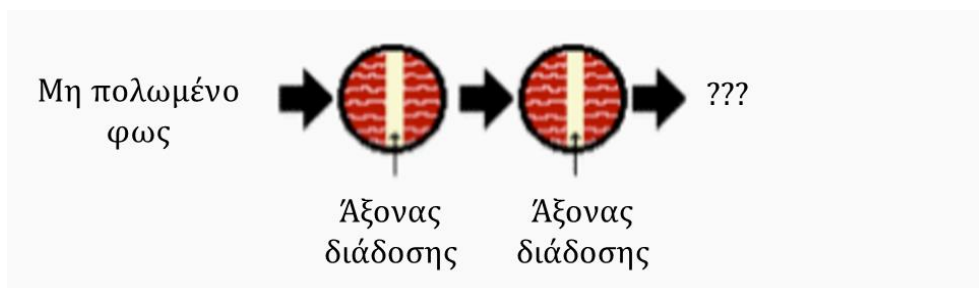
7. Το μοτίβο που παρατηρήσατε στο πείραμα του Young, σας θυμίζει το μοτίβο που παρατηρήσατε στο πείραμα συμβολής μηχανικών κυμάτων; Τι μπορούμε να συμπεράνουμε για τη συμπεριφορά του φωτός;

Η φωτεινή κηλίδα του Fresnel

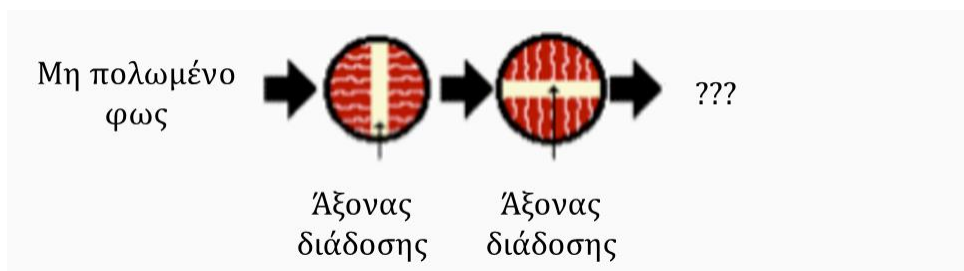
1. Στο πείραμα της φωτεινής κηλίδας του Fresnel (Arago), τι αναμένατε να δείτε στον τοίχο ακριβώς πίσω από τη μεταλλική σφαίρα; Επιβεβαιώθηκε η υπόθεσή σας;
2. Χρησιμοποιήστε τα φαινόμενα της περίθλασης και της συμβολής για να εξηγήσετε την φωτεινή κηλίδα του Fresnel.
3. Ποια είναι εκείνα τα πειραματικά δεδομένα τα οποία καταδεικνύουν ότι το φως έχει κυματική φύση;

Η πόλωση του φωτός

1. Όταν ένα φωτεινό κύμα ταλαντώνεται σε πολλές διευθύνσεις τότε το φως καλείται
 - i. Εγκάρσιο
 - ii. Πολωμένο
 - iii. Μη πολωμένο
2. Όταν ένα φωτεινό κύμα ταλαντώνεται σε ένα μόνο επίπεδο τότε το φως καλείται
 - i. Εγκάρσιο
 - ii. Πολωμένο
 - iii. Μη πολωμένο
3. Περιγράψτε το αποτέλεσμα της διάδοσης φωτός μέσα από δύο διαδοχικά πολωτικά φίλτρα των οποίων οι άξονες διάδοσης είναι μεταξύ τους παράλληλοι.



4. Περιγράψτε το αποτέλεσμα της διάδοσης φωτός μέσα από δύο διαδοχικά πολωτικά φίλτρα των οποίων οι άξονες διάδοσης είναι μεταξύ τους κάθετοι.



5. Σωστό ή λάθος; Τόσο τα εγκάρσια όσο και τα διαμήκη κύματα επιδεικνύουν το φαινόμενο της πόλωσης.
6. Πώς λειτουργούν οι φακοί Polaroid που έχουμε στα γυαλιά ηλίου;

Μέτρηση της ταχύτητας του φωτός

1. Όταν τραβάμε τη χορδή μίας κιθάρας δημιουργείται κάποιο κύμα; Πώς ονομάζεται;
2. Τι είδους κύμα είναι το φως;
 - Εγκάρσιο ή διάμηκες;
 - Ηλεκτρομαγνητικό ή μηχανικό;
3. Ποια είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό;
4. Σχεδιάστε ένα στάσιμο κύμα και σημειώστε τα σημεία τα οποία ταλαντώνονται με μέγιστο πλάτος και τα σημεία που δεν ταλαντώνονται καθόλου. Πως καλούνται αυτά τα σημεία;
5. Γιατί δεν έλιωσε το βούτυρο σε όλη την επιφάνεια του ψωμιού;
6. Αν οι φέτες με το βούτυρο περιστρέφονταν θα είχαμε το ίδιο αποτέλεσμα;
7. Γιατί η τιμή που μετρήσατε για την ταχύτητα του φωτός αποκλίνει από την πραγματική τιμή; Που πιστεύετε ότι οφείλεται η διαφορά αυτή;

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

1. Εξηγείστε το μηχανισμό λειτουργίας του ηλεκτροσκοπίου.
2. Γράψτε την εξίσωση που συνδέει την ενέργεια ενός φωτονίου με την συχνότητά του.
3. Γράψτε την εξίσωση που συνδέει το μήκος κύματος ενός φωτονίου με την συχνότητά του.
4. Ποια ιδιότητα του φωτός αναδεικνύεται μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου;
5. Όταν φως προσπίπτει σε μια μεταλλική επιφάνεια, ποια ιδιότητα του φωτός θα καθορίσει αν θα ελευθερωθούν ηλεκτρόνια;
 - i. Πλάτος
 - ii. Χρόνος έκθεσης
 - iii. Συχνότητα
 - iv. Ένταση
6. Ένας επιστήμονας προσπαθεί να απελευθερώσει ηλεκτρόνια από μια μεταλλική πλάκα φωτίζοντάς την, αλλά κανένα ηλεκτρόνιο δεν απελευθερώνεται. Το πρέπει να κάνει;
 - i. Να μειώσει τη συχνότητα του φωτός
 - ii. Να αυξήσει τη συχνότητα του φωτός
 - iii. Να αυξήσει την ένταση του φωτός
 - iv. Να αυξήσει το μήκος κύματος του φωτός
7. Όταν μια δέσμη φωτός προσπίπτει σε μια μεταλλική επιφάνεια, απελευθερώνει ηλεκτρόνια. Ο αριθμός των φωτοηλεκτρονίων ανά δευτερόλεπτο είναι ανάλογος;
 - i. Της συχνότητας κατωφλίου του μετάλλου

- ii. Της συχνότητας της φωτεινής δέσμης
 - iii. Της έντασης της φωτεινής δέσμης
8. Όταν μια δέσμη φωτός προσπίπτει σε μια μεταλλική επιφάνεια, απελευθερώνει ηλεκτρόνια. Η κινητική ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων είναι ανάλογη:
- i. Της συχνότητας του φωτός
 - ii. Του μήκους κύματος του φωτός
 - iii. Της έντασης του φωτός

Μέτρηση της σταθεράς του Planck

1. Γιατί τα αποτελέσματά σας αποκλίνουν από την πραγματική τιμή της σταθεράς του Planck; Ποιο είναι το ποσοστό απόκλισης; Που οφείλεται αυτό;

Περίθλαση ηλεκτρονίων

1. Το πείραμα της διπλής σχισμής με ηλεκτρόνια καταδεικνύει ότι:
 - i. Τα ηλεκτρόνια είναι πακέτα ενέργειας
 - ii. Το φως έχει κυματικές και σωματιδιακές ιδιότητες
 - iii. Τα ηλεκτρόνια έχουν κυματικές και σωματιδιακές ιδιότητες
 - iv. Η συμπεριφορά της ύλης σε μικροσκοπικό επίπεδο είναι προβλέψιμη με απόλυτη ακρίβεια.
2. Στο πείραμα της διπλής σχισμής, τα ηλεκτρόνια
 - i. Συμπεριφέρονται ως κύματα και συμπεριφέρονται ως σωματίδια
 - ii. Χωρίζονται στη μέση και περνάνε και από τις δύο σχισμές ταυτόχρονα
 - iii. Συμπεριφέρονται ως σωματίδια αλλά είναι κύματα
 - iv. Είναι και κύματα και σωματίδια ταυτοχρόνως
3. Προκειμένου οι επιστήμονες να κατανοήσουν το πείραμα της διπλής σχισμής, ήταν αναγκαίο να στείλουν στη διπλή σχισμή ηλεκτρόνια με ρυθμό ένα ηλεκτρόνιο ανά δευτερόλεπτο και όχι μια δέσμη ηλεκτρονίων. Γιατί;
4. Τι συμβαίνει στο πείραμα της διπλής σχισμής με ηλεκτρόνια όταν δίπλα από τη μία σχισμή τοποθετούμε έναν ανιχνευτή; Πως εξηγούν οι φυσικοί αυτό το αποτέλεσμα;
5. Αν ρίξουμε ένα ηλεκτρόνιο σε ένα πέτασμα μπορούμε να γνωρίζουμε με βεβαιότητα το σημείο που αυτό τα χτυπήσει το πέτασμα; Αν ρίξουμε πολλά ηλεκτρόνια στο πέτασμα τι μπορούμε να πούμε για το που θα καταλήξουν τα ηλεκτρόνια;
6. Συζητάτε με έναν φίλο σας το πείραμα της διπλής σχισμής με ηλεκτρόνια. Αυτός λέει ότι *“Οι φυσικοί κατανοούν πλήρως τα αποτελέσματα του πειράματος. Κάθε ηλεκτρόνιο φεύγει από την πηγή ως κλασικό σωματίδιο και χτυπά την οθόνη επίσης ως κλασικό σωματίδιο. Όλοι οι επιστήμονες συμφωνούν ότι το ηλεκτρόνιο συμπεριφέρεται ως κλασικό σωματίδιο στο πείραμα της διπλής σχισμής”*. Γράψτε μια μικρή απάντηση 3-4 γραμμών στην οποία να εξηγείται γιατί ο φίλος σας κάνει λάθος.

7. Η κβαντική φυσική αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινής μας ζωής. Απαριθμήστε πέντε τεχνολογικές εφαρμογές της κβαντικής φυσικής στην καθημερινότητα.

Το φαινόμενο Casimir

1. Περιγράψτε με λίγα λόγια τα συμπεράσματα του πειράματος που πρότεινε ο Casimir.

4. Βιβλιογραφία

1. Douglas C. Giancoli, (2013), Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics, Pearson Education Limited, ISBN-13: 978-1292020761
2. Encyclopedia Britannica -Planck's constant
3. Hewitt, P. (2015). Conceptual physics, 12th ed. Pearson, ISBN 13: 9780321909107
4. Howard, I. P., & Wade, N. J. (1996). Ptolemy's contributions to the geometry of binocular vision. Perception, 25(10), 1189-1201.
5. Œuvres complètes d'Augustin Fresnel: Théorie de la lumière
6. Physical interpretation of the Planck's constant based on the Maxwell theory – Donald C. Chang -Macro-Science Group, Division of LIFS Hong Kong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Hong Kong
7. Sabra, A. I. (1981). Theories of light: from Descartes to Newton. CUP Archive.
8. Serway Raymond, Jewett W. John (2013), Φυσική για Επιστήμονες και Μηχανικούς, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα, ISBN 9789604615094
9. Serway, R. and Jewett, J. (2012), Principles of Physics: A Calculus-Based Text, Cengage Learning, Brooks/Cole, Boston, ISBN-13: 978-1133104261
10. Smith, A. M. (1998). Ptolemy, Alhazen, and Kepler and the problem of optical images. Arabic Sciences and Philosophy, 8(01), 9-44.
11. Young D. Hugh, (2010), Πανεπιστημιακή Φυσική με Σύγχρονη Φυσική – Δεύτερος Τόμος, Εκδόσεις Παπαζήσης, Αθήνα, ISBN 9789600224733
12. Φυσική (Θετικής και Τεχνολογικής Κατεύθυνσης) – Βιβλίο Μαθητή – Οργανισμός Εκδόσεων Διδακτικών Βιβλίων Αθήνα – 1999

