

**ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ  
ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ**



# **ΦΥΣΙΚΗ**

**ΓΕΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ  
Β΄ ΤΑΞΗΣ ΓΕΝΙΚΟΥ ΛΥΚΕΙΟΥ**

**Τόμος 3<sup>ος</sup>**



**ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ**

# **ΦΥΣΙΚΗ**

**Β΄ ΤΑΞΗΣ ΓΕΝΙΚΟΥ ΛΥΚΕΙΟΥ**  
**3ος τόμος**

**ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ  
ΕΚΔΟΣΕΩΝ «ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ»**

**Η επανέκδοση του παρόντος βιβλίου  
πραγματοποιήθηκε  
από το Ινστιτούτο Τεχνολογίας Υπολογιστών &  
Εκδόσεων**

**«Διόφαντος» μέσω ψηφιακής μακέτας, η οποία  
δημιουργήθηκε με χρηματοδότηση από το ΕΣΠΑ / ΕΠ  
«Εκπαίδευση & Διά Βίου Μάθηση» / Πράξη «ΣΤΗΡΙΖΩ».  
Οι αλλαγές που ενσωματώθηκαν στην παρούσα  
επανέκδοση έγιναν με βάση τις διορθώσεις του  
Ινστιτούτου Εκπαιδευτικής Πολιτικής.**

## **ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΡΧΙΚΗΣ ΕΚΔΟΣΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΑΝΕΚΔΟΣΗΣ**

**Το κεφάλαιο 1 προέρχεται από το βιβλίο «Φυσική Γενικής Παιδείας Β΄ Τάξης Γενικού Λυκείου», ΟΕΔΒ 2010.**

### **ΟΜΑΔΑ ΣΥΓΓΡΑΦΗΣ**

**Αλεξάκης Νίκος, Msc φυσικός, καθηγητής 5ου Λυκείου Κορυδαλλού**

**Αμπατζής Σταύρος, Δρ φυσικός, καθηγητής Γενναδείου Σχολής**

**Γκουγκούσης Γιώργος, φυσικός, ιδιοκτήτης - διευθυντής φροντιστηρίου**

**Κουντούρης Βαγγέλης, φυσικός, καθηγητής 1ου Γυμνασίου Ιλίου**

**Μοσχοβίτης Νίκος, φυσικός, καθηγητής εκπ/ρίων Κωστέα - Γείτονα**

**Οβαδίας Σάββας, φυσικός, καθηγητής Λυκείου Ν. Αρτάκης**

**Πετρόχειλος Κλεομένης, φυσικός, καθηγητής Αμερικανικού Κολλεγίου**

**Σαμπράκος Μενέλαος, φυσικός, ιδιοκτήτης - διευθυντής φροντιστηρίου**

**Ψαλίδας Αργύρης, Δρ φυσικός, καθηγητής Κολλεγίου Αθηνών**

### **ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ ΣΥΓΓΡΑΦΙΚΗΣ ΟΜΑΔΑΣ**

**Πετρόχειλος Κλεομένης, φυσικός, καθηγητής Αμερικανικού Κολλεγίου**

### **ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΕΝΘΕΤΑ**

**Καζαντζή Μαρία, φυσικός, καθηγήτρια β/θμιας εκπαίδευσης**

**ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΟΥ ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟΥ  
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ**

**Ραγιαδάκης Χρήστος, πρόεδρος στον τομέα Φυσικών  
Επιστημών του Παιδαγωγικού Ινστιτούτου  
ΓΛΩΣΣΙΚΗ ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ**

**Χριστοδούλου Ειρήνη, φιλόλογος**

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΝΤΥΠΟΥ ΚΑΙ ΚΑΛΛΙΤΕΧΝΙΚΗ  
ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ**

**Παπαζαχαροπούλου Μαρία**

**ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΧΗΜΑΤΩΝ**

**Γαβριηλίδου Δανάη**

**ΜΑΚΕΤΤΑ ΕΞΩΦΥΛΛΟΥ:**

**«ΑΦΟΙΠΕΡΓΑΜΑΛΗ»**

**Το κεφάλαιο 2 προέρχεται από το βιβλίο «Φυσική  
Γενικής Παιδείας Α΄ Τάξης Γενικού Λυκείου», ΟΕΔΒ  
2010.**

**ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΤΗΣ ΣΥΓΓΡΑΦΙΚΗΣ ΟΜΑΔΑΣ**

**Παναγιώτης Β. Κόκκοτας, Καθηγητής της Διδακτικής  
των Φυσικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Αθηνών**

**ΣΥΓΓΡΑΦΙΚΗ ΟΜΑΔΑ**

**Ιωάννης Α. Βλάχος, Διδάκτορας, Σχολικός Σύμβουλος  
του κλάδου ΠΕ4**

**Ιωάννης Γ. Γραμματικάκης, Επίκουρος Καθηγητής  
Φυσικής στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**

**Βασίλης Α. Καραπαναγιώτης, Φυσικός, Καθηγητής  
Πειραματικού Σχολείου Πανεπιστημίου Αθηνών**

**Περικλής Εμ. Περιστερόπουλος, Φυσικός, Υποψήφιος  
Διδάκτορας, Καθηγητής στο 3ο Λύκειο Βύρωνα**

**Γιώργος Β. Τιμοθέου, Φυσικός, Λυκειάρχης στο 2ο  
Λυκείου Αγ. Παρασκευής**

## **ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΚΡΙΣΗΣ**

**Φλυτζάνης Νικόλαος** (Πρόεδρος), Καθηγητής  
Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Κρήτης  
**Καλοψικάκης Εμμανουήλ**, Φυσικός, τ. Σχολικός  
Σύμβουλος

**Ξενάκης Χρήστος**, Δρ. Φυσικός, Σχολικός Σύμβουλος  
Φθιώτιδος

**Πάλλας Δήμος**, Φυσικός, Υποδιευθυντής 1ου Λυκείου  
Λαμίας

**Στεφανίδης Κωνσταντίνος**, Δρ. Φυσικός, Σχολικός  
Σύμβουλος Πειραιά

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους Καθηγητές της  
Φυσικής που μας βοήθησαν στο έργο μας:

1. Την Σωτηρία Θεοδωρίδου για τη συμβολή της στις  
Λύσεις των Ασκήσεων, στις Περιλήψεις, στο Ευρετήριο  
και στο Γλωσσάρι.
2. Την Σοφία Ιωαννίδου για τη συμβολή της στη Λύση  
των ασκήσεων Α΄ και Β΄ Λυκείου.
3. Τον Κώστα Ζαχαριάδη και την Ταραώ Μπουγά για τις  
εύστοχες παρατηρήσεις τους στο βιβλίο της Γ΄ Λυκείου  
Γενικής Παιδείας.
4. Την Γεωργία Αγγελοπούλου για τις Ασκήσεις που  
πρότεινε να συμπεριληφθούν στα βιβλία.
5. Την Μαρία Σωτηράκου για τη συμβολή της στο  
Ευρετήριο.

Οι συγγραφείς ευχαριστούν τον Ιωάννη Βαγιωνάκη,  
Φυσικό, για τη συμβολή του στη συγγραφή ασκήσεων  
και ερωτήσεων, για τις παρατηρήσεις και υποδείξεις  
του, καθώς και για τη βοήθειά του στην επιμέλεια  
έκδοσης.

**Το κεφάλαιο 3,4 προέρχεται από το βιβλίο «Φυσική Γενικής Παιδείας Γ΄ Τάξης Γενικού Λυκείου», ΟΕΔΒ 2012**

#### **ΟΜΑΔΑ ΣΥΓΓΡΑΦΗΣ**

**Πέτρος Γεωργακάκος, φυσικός, καθηγητής 3ου Λυκείου Ηλιούπολης**

**Αθανάσιος Σκαλωμένος, φυσικός, καθηγητής 1ου Λυκείου Ζωγράφου**

**Νικόλαος Σφαρνάς, φυσικός, καθηγητής 56ου Λυκείου Αθηνών**

**Ιωάννης Χριστακόπουλος, φυσικός, καθηγητής του Ε.Π.Λ. Νέας Φιλαδέλφειας «Μίλτος Κουντουράς»**

#### **ΟΜΑΔΑ ΚΡΙΣΗΣ**

**Ευάγγελος Κούκλης, φυσικός, καθηγητής 6ου Λυκείου Ζωγράφου**

**Σπύρος Τζαμαρίας, φυσικός στοιχειωδών σωματιδίων. Κύριος ερευνητής Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος»**

**Χρήστος Χρονόπουλος, φυσικός, καθηγητής 4ου Λυκείου Αμαρουσίου**

#### **ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΟΥ ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟΥ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ**

**Χρήστος Δούκας, πάρεδρος Παιδαγωγικού Ινστιτούτου, τομέας Φυσικών Επιστημών**

#### **ΓΛΩΣΣΙΚΗ ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ**

**Μαιρίτα Κλειδωνάρη, φιλόλογος, καθηγήτρια Λυκείου Αγίου Στεφάνου**



**ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΒΙΒΛΙΟΥ ΓΙΑ ΜΑΘΗΤΕΣ ΜΕ  
ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΟΡΑΣΗ**  
**Ομάδα Εργασίας Υπ. Παιδείας, Δια Βίου Μάθησης και  
Θρησκευμάτων**

**ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ: Φλεμοτόμου Ιουστίνα (ΙΕΠ)**  
**ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ: Σπανάκη Άννα (ΙΕΠ)**





## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ 3ου ΤΟΜΟΥ

### 3. ΤΟ ΦΩΣ

<b>3.1 Η ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ</b> .....	19
Η κυματική φύση του φωτός. Η ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell .....	22
Η σωματιδιακή φύση του φωτός. Θεωρία των κβάντα.....	24
<b>3.2 Η ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ</b> .....	26
Η μέθοδος του Fizeau .....	27
<b>3.3 ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ</b> .....	30
Ανάκλαση και διάθλαση του φωτός .....	30
Ταχύτητα και μήκος κύματος του φωτός μέσα στην ύλη.....	31
<b>3.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΥΚΟΥ ΦΩΤΟΣ ΚΑΙ ΧΡΩΜΑΤΑ</b> .....	35
Διασκεδασμός και πρίσματα Ανάλυση του λευκού φωτός.....	36
Ουράνιο τόξο - Τα χρώματα της φύσης.....	40
Υπεριώδης και υπέρυθρη ακτινοβολία.....	47
<b>3.5 ΠΟΛΩΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ</b> .....	52
Φυσικό φως και γραμμικά πολωμένο φως.....	52
Πολωτικό φίλτρο – Πολωτής .....	55
Συνδυασμός δύο πολωτικών φίλτρων – Αναλύτης.....	58
Πόλωση από ανάκλαση - Φυσική πόλωση .....	61
Πόλωση από σκέδαση – Κυανό χρώμα του ουρανού .....	66
Οπτικώς ενεργά σώματα - Στροφή του επιπέδου πόλωσης του φωτός.....	69
Ελεύθερο ανάγνωσμα.....	71
Γιατί ο ουρανός είναι γαλανός; .....	74
Δραστηριότητα .....	78

Σύνοψη 3ου κεφαλαίου .....	80
Ερωτήσεις .....	82
Ασκήσεις και Προβλήματα .....	87

## 4 ΑΤΟΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

---

<b>4.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟΥ ΣΤΟ ΑΤΟΜΟ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ .....</b>	<b>93</b>
Πρότυπο του Thomson - Πρότυπο του Rutherford.....	95
Ατομικά φάσματα.....	99
Το πρότυπο του Bohr για το υδρογόνο.....	102
Ολική ενέργεια ηλεκτρονίου .....	105
Επιτρεπόμενες τροχιές και τιμές ενέργειας.....	106
<b>4.2 ΔΙΑΚΡΙΤΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΣΤΑΘΜΕΣ .....</b>	<b>111</b>
Ενεργειακές στάθμες - Διέγερση του ατόμου.....	111
Ιονισμός του ατόμου.....	113
<b>4.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΦΩΤΟΝΙΩΝ.....</b>	<b>114</b>
Διέγερση με κρούση.....	114
Διέγερση με απορρόφηση ακτινοβολίας.....	115
Η επιτυχία και η αποτυχία του προτύπου του Bohr .....	117
<b>4.4 ΑΚΤΙΝΕΣ Χ.....</b>	<b>121</b>
Παραγωγή των ακτινών Χ.....	122
Φύση - Φάσμα των ακτινών .....	123
Απορρόφηση των ακτίνων Χ.....	126
Χρήσεις των ακτίνων .....	127
Βιολογικές βλάβες που προκαλούν οι ακτίνες Χ.....	129
Σύνοψη 4ου κεφαλαίου .....	132
Ερωτήσεις .....	134
Ασκήσεις και Προβλήματα .....	140
Αιτιοκρατία/κβαντομηχανική.....	146

# ( 3 ΦΩΣ )



Το φως κατά το σούρουπο διανύει μεγάλη απόσταση μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα και ένα σημαντικό μέρος του κυανού χρώματος σκεπάζεται. Το φως που προσπίπτει σε ένα νέφος, όταν ανακλάται από το νέφος και γίνεται τελικά ορατό από τον παρατηρητή, έχει κίτρινη έως ερυθρή απόχρωση.



Ένας πολωτής τύπου polaroid, που έχει προσαρτηθεί στο φακό μιας φωτογραφικής μηχανής, επιλέγει τα κύματα με μία συγκεκριμένη διεύθυνση πόλωσης και εμποδίζει όλα τα άλλα κύματα. Έτσι ο φωτογράφος κατάφερε να αποτυπώσει το στιγμιότυπο της διπλανής εικόνας και φωτογράφησε ακόμα και τον Ήλιο.

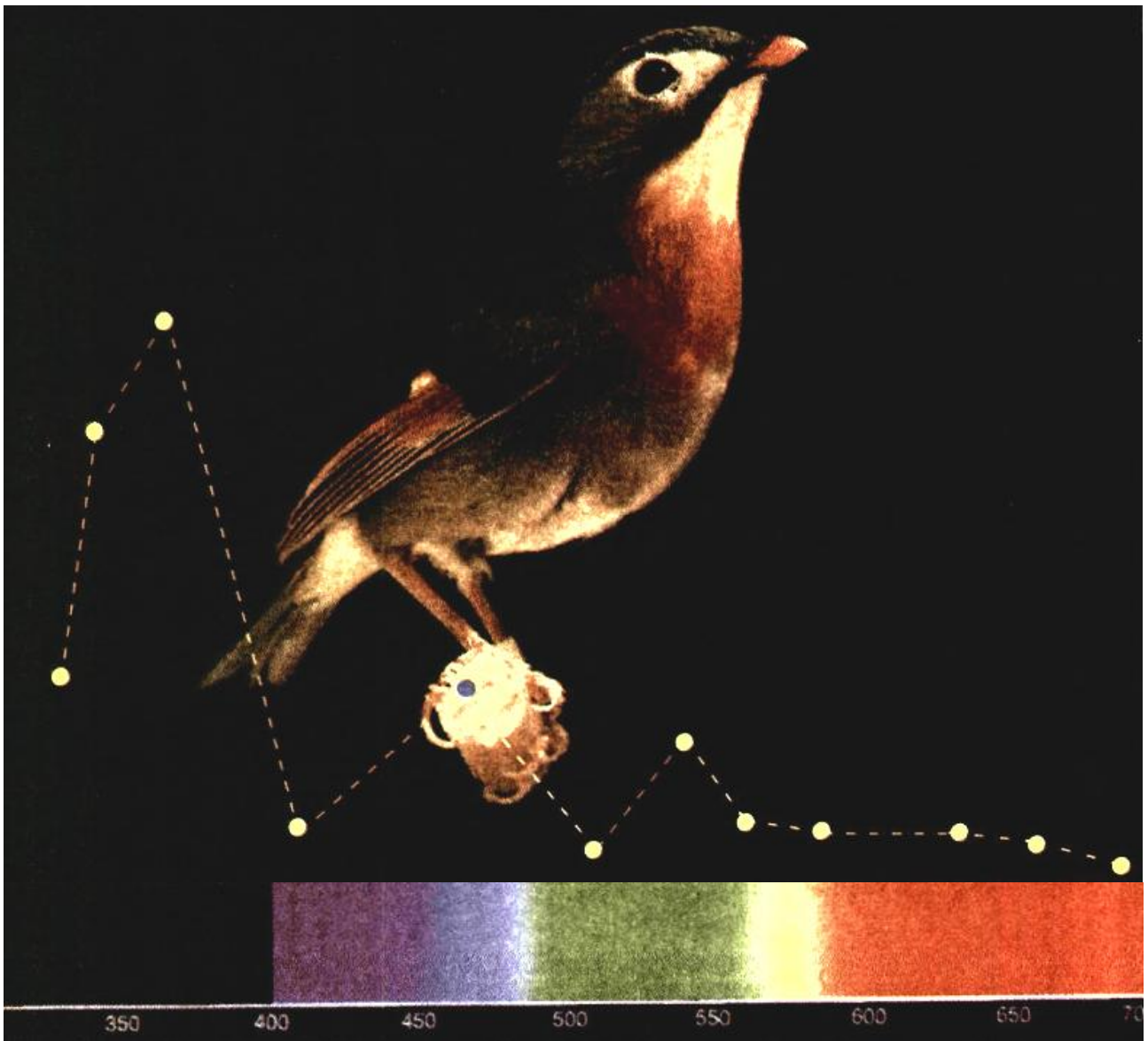
**3.1 Η φύση του φωτός**

**3.2 Η ταχύτητα του φωτός**

**3.3 Μήκος κύματος και συχνότητα φωτός**

**3.4 Ανάλυση λευκού φωτός και χρώματα**

**3.5 Πόλωση του φωτός**

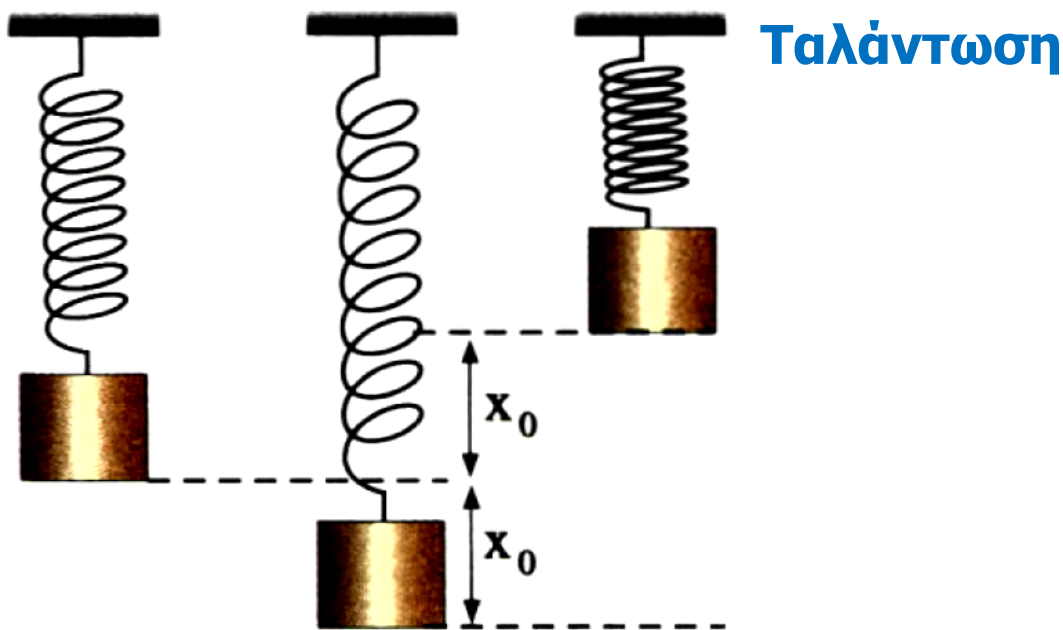


Η ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού όσον αφορά την αντίληψη των χρωμάτων κυμαίνεται από τα 400nm περίπου (ιώδες φως) έως τα 700nm περίπου (ερυθρό φως). Αυτή η ευαισθησία καθορίζεται κυρίως από τους υποδοχείς που υπάρχουν στα αισθητήρια όργανα της όρασης του ανθρώπου.

Το ερώτημα είναι αν και τα άλλα ζωικά είδη υπόκεινται σε παρόμοιους περιορισμούς της όρασης τους. Πιστεύεται πάντως ότι τα ημερόβια πουλιά διαθέτουν μηχανισμούς που τους επιτρέπουν να βλέπουν το υπεριώδες φως. Συγκεκριμένα, το «πουλί του Ήλιου» της παραπάνω εικόνας έχει ευαισθησία από τα 330nm (υπεριώδες φως) έως τα 680nm (ερυθρό φως).



## Εισαγωγικό ένθετο



## Ταλάντωση

Το σώμα του διπλανού σχήματος είναι εξαρτημένο από το άκρο του ελατηρίου σταθεράς  $k$ . Αν το απομακρύνουμε από τη θέση ισορροπίας του κατά  $x_0$  και ύστερα το αφήσουμε ελεύθερο, θα εκτελέσει μια κίνηση η οποία θα επαναλαμβάνεται σε ίσα χρονικά διαστήματα.

Μια τέτοια κίνηση, όπως αυτή του συστήματος ελατηρίου - μάζας, ονομάζεται **απλή αρμονική ταλάντωση**.

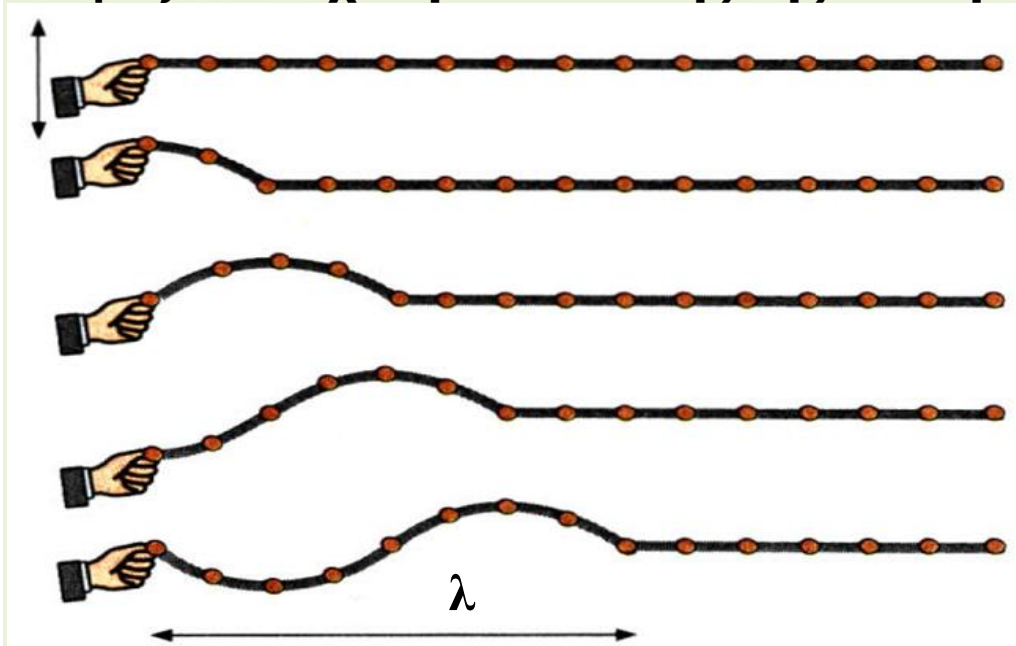
- Η μέγιστη απομάκρυνση  $x_0$  του σώματος από τη θέση ισορροπίας του ονομάζεται **πλάτος** της ταλάντωσης.
  - Ο χρόνος που χρειάζεται το σώμα, για να περάσει διαδοχικά δύο φορές από το ίδιο σημείο της τροχιάς του και με την ίδια φορά, ονομάζεται **περίοδος**  $T$ . Είναι φανερό ότι σε χρόνο μιας περιόδου το σώμα εκτελεί μια πλήρη ταλάντωση.
  - Το πηλίκο του αριθμού των ταλαντώσεων ( $N$ ), που κάνει το σώμα σε χρόνο  $t$ , προς το χρόνο  $t$  ονομάζεται **συχνότητα**  $f$ .
- Δηλαδή:

$f = N/t$ , για  $t = T$  και  $N = 1$ , παίρνουμε:  $f = 1/T$

• Επίσης εδώ πρέπει να τονίσουμε ότι η ενέργεια του ταλαντωτή εξαρτάται από το πλάτος της ταλάντωσης και δίνεται από τη σχέση:  $E = \frac{1}{2} kx_0^2$ .

## Κύμα

Ονομάζουμε μηχανικό κύμα κάθε διαταραχή που διαδίδεται με πεπερασμένη ταχύτητα σε ένα υλικό ελαστικό μέσο. Το ελαστικό υλικό μέσο φανταζόμαστε ότι αποτελείται από στοιχειώδεις δομικές μονάδες που έχουν ελαστική σύζευξη μεταξύ τους, δηλαδή συνδέονται με ελαστικές δυνάμεις. Αν προκαλέσουμε μια διαταραχή σε ένα σημείο του ελαστικού μέσου, αυτή μεταδίδεται στην επόμενη, στη μεθεπόμενη κ.ο.κ. δομική μονάδα με πεπερασμένη ταχύτητα, η οποία ονομάζεται ταχύτητα διάδοσης της διαταραχής.



Στο παραπάνω σχήμα το χέρι μας κρατάει το ένα άκρο οριζόντιου σχοινιού και εκτελεί αρμονική ταλάντωση σε κατακόρυφη διεύθυνση με συχνότητα  $f$ . Παρατηρούμε ότι αυτή η ταλάντωση διαδίδεται από το χέρι μας σε κάθε δομική μονάδα του σχοινιού προς τα δεξιά. Τέτοια κύματα στα οποία τα μόρια του μέσου ταλαντώνονται

σε διεύθυνση κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος ονομάζονται **εγκάρσια κύματα**.

Η συχνότητα ταλάντωσης των μορίων του μέσου είναι ίδια με τη συχνότητα ταλάντωσης του χεριού μας, που στην προκειμένη περίπτωση αποτελεί την πηγή του κύματος. Η συχνότητα αυτή είναι η συχνότητα του κύματος.

- **Ταχύτητα διάδοσης (c)** του κύματος σε κάποιο μέσο ονομάζουμε το πηλίκο της απόστασης  $x$ , που διανύει το κύμα (διαταραχή) κατά μήκος μιας διεύθυνσης διάδοσης, σε χρόνο  $t$  προς το χρόνο αυτό.

Δηλαδή ισχύει:

$$c = x / t \quad (1)$$

Η ταχύτητα διάδοσης  $c$  εξαρτάται από τη φύση του ελαστικού μέσου διάδοσης.

- **Μήκος κύματος ( $\lambda$ )** ονομάζουμε την απόσταση που διατρέχει το κύμα σε χρόνο μιας περιόδου. Αν στην (1) θέσουμε όπου  $x = \lambda$  και  $t = T$ , παίρνουμε:

$$c = \lambda / T \text{ και, αν θέσουμε όπου } T = 1 / f, \\ \text{παίρνουμε: } c = \lambda f$$

Η σχέση  $c = \lambda f$  ισχύει για οποιοδήποτε αρμονικό κύμα και ονομάζεται **θεμελιώδης εξίσωση της κυματικής**. Τονίζουμε εδώ ότι η συχνότητα  $f$  καθορίζεται από την πηγή και ότι με τη συχνότητα αυτή ταλαντώνονται όλα τα σωματίδια του ελαστικού μέσου κατά τη διάδοση του κύματος. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι ένα ορισμένο κύμα, που διαδίδεται σε διαφορετικά ελαστικά μέσα, θα έχει την ίδια συχνότητα σε όλα τα μέσα, αλλά διαφορετικές τιμές μήκους κύματος και ταχύτητας διάδοσής του.

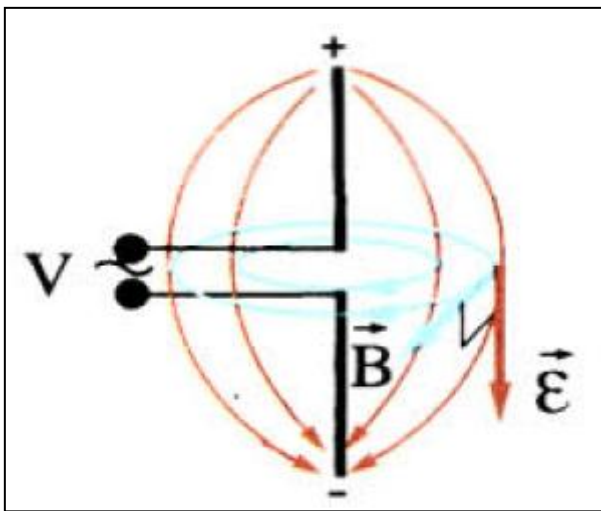
## Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

Ο ήχος στο ραδιόφωνο και ο ήχος και η εικόνα στην τηλεόραση λαμβάνονται από αυτές τις συσκευές χάρη στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που στέλνονται από τις

κεραίες των ραδιοφωνικών και των τηλεοπτικών σταθμών αντίστοιχα.

Όμως τι είναι και πώς παράγονται αυτά τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα;

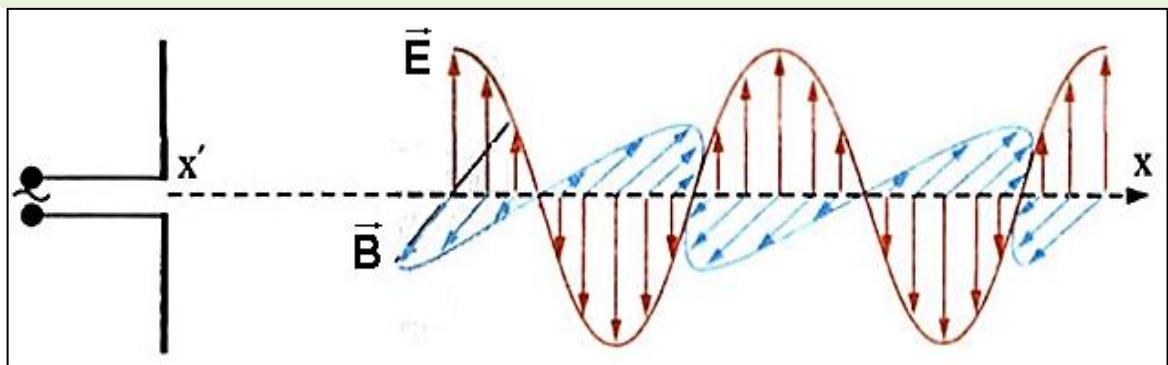
Ας θεωρήσουμε μια κεραία, δηλαδή ένα συρμάτινο αγωγό, η οποία τροφοδοτείται από εναλλασσόμενη τάση  $V$ . Η κεραία διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια μέσα σ' αυτήν εκτελούν αρμονική ταλάντωση. Γύρω από την κεραία δημιουργείται ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό πεδίο,



των οποίων οι δυναμικές γραμμές, κάποια χρονική στιγμή, εικονίζονται στο σχήμα (α).

(α)

(β)



Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλονται ημιτονοειδώς με το χρόνο και αυτή η μεταβολή διαδίδεται, απομακρυνόμενη από την κεραία, κατά μήκος της ευθείας  $x'x$ , που αποτελεί και τη διεύθυνση

διάδοσης του κύματος. Η διαδιδόμενη αυτή διαταραχή ονομάζεται **ηλεκτρομαγνητικό κύμα**.

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα δε χρειάζεται κάποιο ελαστικό μέσο για να διαδοθεί. Διαδίδεται ακόμα και στο κενό με ταχύτητα  $c_0$ , γνωστή ως ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο κενό. Σε κάθε θέση της ευθείας  $x'x$  οι εντάσεις του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου είναι κάθετες μεταξύ τους, καθώς επίσης και προς τη διεύθυνση διάδοσης (σχήμα β). Γι' αυτό λέμε ότι το ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι εγκάρσιο κύμα.

Όπως στο μηχανικό κύμα τα μόρια του μέσου εκτελούν αρμονικές ταλαντώσεις, έτσι και στο ηλεκτρομαγνητικό κύμα η ένταση  $\epsilon$  του ηλεκτρικού και η ένταση  $B$  του μαγνητικού πεδίου, σε κάθε σημείο, ταλαντώνονται αρμονικά.

# Τι είναι το φως, σωματίδιο ή κύμα;

## 1.1 Η ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Από πολύ παλιά, στους αρχαιότατους χρόνους, φιλόσοφοι και φυσιοδίφες προσπαθούσαν να κατανοήσουν και να ερμηνεύσουν τη «φύση» του φωτός. Για πολλά χρόνια ήταν αντικείμενο μακρόπνων συζητήσεων, διαφωνιών, επιχειρημάτων και αντεπιχειρημάτων.

Το φως ήταν και είναι μια βασική αιτία της ύπαρξης ζωής στον πλανήτη μας. Ας μην ξεχνάμε ότι τα φυτά, με τη φωτοσύνθεση, μετατρέπουν την ενέργεια που παρέχει το φως του Ήλιου σε χημική ενέργεια, την οποία χρησιμοποιούν στη συνέχεια για την ανάπτυξή τους. Το φως είναι αυτό που κάνει ορατά τα αντικείμενα που βρίσκονται στον πλανήτη μας, τη Γη, και στο Σύμπαν. Με τη βοήθεια του φωτός «επικοινωνούμε» με τα άστρα και τους πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος αντλώντας χιλιάδες πληροφορίες για τη σύστασή τους (φασματοσκοπική μέθοδος).

Ο Αριστοτέλης αναφέρει: Ο Εμπεδοκλής έλεγε ότι το φως, όντας κάτι το σωματιδιακό, που απορρέει από το φωτίζον σώμα, φθάνει πρώτα στο μεταξύ της Γης και του ουρανού χώρο και ύστερα σε μας. Μας διαφεύγει όμως η κίνησή του αυτή λόγω της ταχύτητάς του.

Πρώτοι οι αρχαίοι Έλληνες είχαν αντιληφθεί και διατυπώσει αυτό που εμείς σήμερα ονομάζουμε «σωματιδιακή φύση» του φωτός. Πίστευαν δηλαδή ότι το φως που εκπέμπει ο Ήλιος, αλλά και κάθε φωτοβόλουσα πηγή, αποτελείται από μικρά σωματίδια τα οποία κινούνται με πολύ μεγάλη ταχύτητα και, όταν



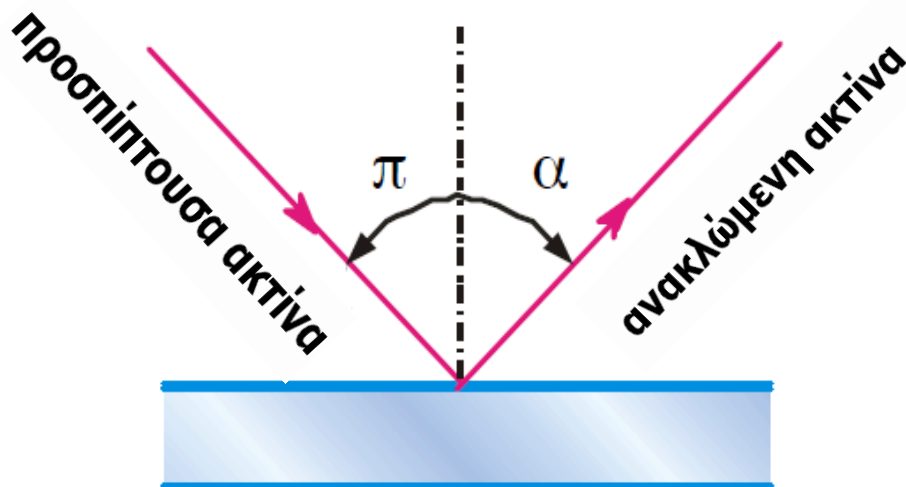
πέφτουν στο μάτι του παρατηρητή, διεγείρουν το αισθητήριο όργανο της όρασης.

Σ' αυτή ακριβώς τη σκέψη, δηλαδή τη σωματιδιακή φύση του φωτός, στηρίχτηκε, πολύ μεταγενέστερα, ο Newton (Νεύτωνας), για να διατυπώσει, με βάση τις αρχές της διατήρησης της ενέργειας και της ορμής, το νόμο της ανάκλασης του φωτός, δηλαδή:



Isaac Newton

γωνία πρόσπτωσης ( $\pi$ ) = γωνία ανάκλασης ( $\alpha$ )



Δύο σημαντικά φαινόμενα, η περίθλαση και η συμβολή του φωτός, απασχόλησαν τους φυσικούς Christian Huygens (Κρίστιαν Χούχενς, 1629-1695) και Tomas Young (Τόμας Γιανγκ, 1773-1829) το 1670 και 1803 αντίστοιχα. Οι Huygens και Young, μέσα από πειραματικές διαδικασίες πάνω στα φαινόμενα αυτά, απέδειξαν ότι το φως έχει κυματική φύση και συγκεκριμένα ότι είναι εγκάρσια κύματα.



**James Clerk Maxwell**  
**Το φως είναι εγκάρσια**  
**ηλεκτρομαγνητικά κύματα.**

Το αποκορύφωμα της έρευνας για τη φύση του φωτός ήρθε το 1865, όταν ο Maxwell (Μάξγουελ), αναπτύσσοντας τη μεγαλειώδη θεωρία του, απέδειξε ότι το φως είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Συνεχίζοντας την ιστορική αναδρομή συναντάμε στις αρχές του 20ού αιώνα το Max Planck (Μαξ Πλανκ, 1858-1947), ο οποίος χρησιμοποίησε τη σωματιδιακή φύση του φωτός, για να ερμηνεύσει την ακτινοβολία που εκπέμπουν τα θερμά σώματα.

Στην πιο σύγχρονη εποχή ο Einstein (Αϊνστάιν) χρησιμοποιώντας τη σωματιδιακή φύση του φωτός ερμηνεύει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (εκπομπή ηλεκτρονίων από μέταλλα, όταν πάνω σ' αυτά προσπίπτει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία).

Σήμερα πιστεύουμε στη διπλή φύση του φωτός, δηλαδή ότι το φως συμπεριφέρεται ως κύμα και ως σωματίδιο που ονομάζεται φωτόνιο. Σε φαινόμενα όπως η συμβολή, η περίθλαση και η πόλωση εκδηλώνεται η κυματική φύση του φωτός (ηλεκτρομαγνητικό κύμα), ενώ σε φαινόμενα που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση του φωτός με την ύλη (απορρόφηση - εκπομπή), όπως το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, εκδηλώνεται η σωματιδιακή φύση του φωτός.

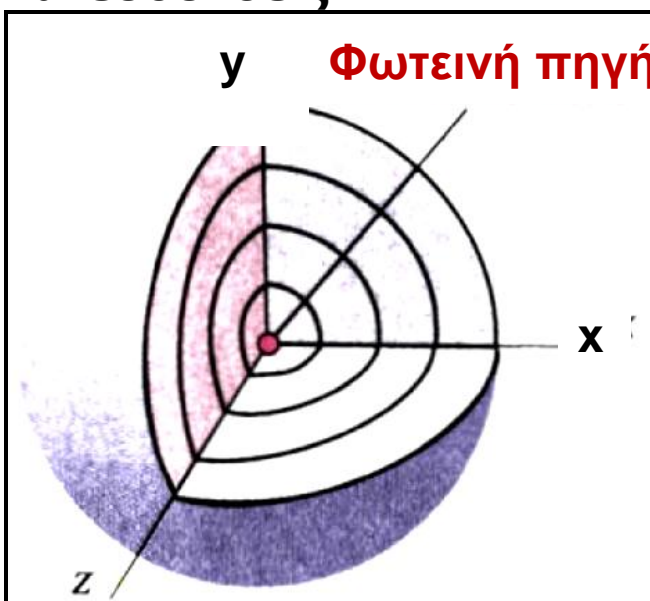
Η ερώτηση λοιπόν «τι είναι το φως, σωματίδιο ή κύμα;» είναι εσφαλμένη, γιατί το φως συμπεριφέρεται ως κύμα και ως σωματίδιο.



## Η κυματική φύση του φωτός.

### Ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell

Η πιο σημαντική εξέλιξη του 19ου αιώνα στη μελέτη παραγωγής και διάδοσης του φωτός υπήρξε το έργο του Maxwell, ο οποίος το 1873 διατύπωσε τη θεωρία της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, το φως είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία ξεκινούν από τη φωτεινή πηγή και διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις.

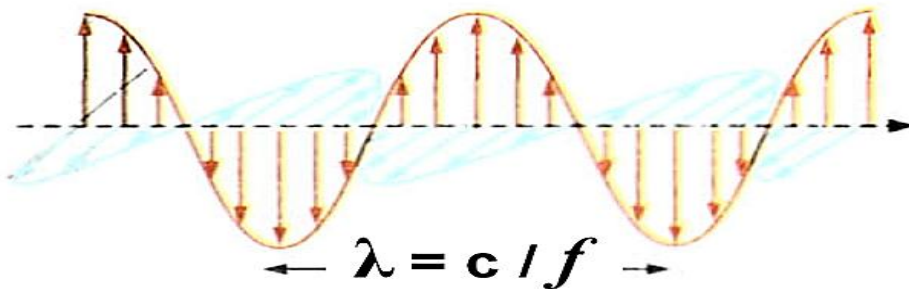


Εικόνα 3.1-1 Σφαιρικά μέτωπα κύματος διαδίδονται ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις ξεκινώντας από μία πηγή φωτός.

Ο Maxwell απέδειξε ότι, όταν ένα ηλεκτρικό φορτίο ταλαντώνεται, παράγει ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα αποτελείται από ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό κύμα. Δηλαδή είναι ένα πεδίο με δύο χαρακτηριστικά, την ένταση  $\epsilon$  του ηλεκτρικού πεδίου και την ένταση  $B$  του μαγνητικού πεδίου, των οποίων τα διανύσματα είναι κάθετα μεταξύ τους και μεταβάλλονται από θέση σε θέση και από στιγμή σε στιγμή. Γι' αυτό το λόγο χαρακτηρίζονται ως δύο τοπικά και χρονικά μεταβαλλόμενα μεγέθη ( $\epsilon$  και  $B$ ).

Οι εντάσεις των πεδίων  $\epsilon$  και  $B$  παίρνουν ταυτόχρονα τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή, δηλαδή έχουν την ίδια φάση και διαδίδονται με την ίδια ταχύτητα  $c$  (σχήμα 1-2).

### Διεύθυνση διάδοσης του κύματος



Εικόνα 3.1-2 Στιγμιότυπο ηλεκτρομαγνητικού κύματος μακριά από την πηγή, που διαδίδεται οριζόντια. Οι εντάσεις  $\epsilon$  και  $B$  των πεδίων είναι κάθετες στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος και γι' αυτό τα κύματα αυτά ονομάζονται εγκάρσια.

Οι συνηθισμένες πηγές ορατού φωτός δίνουν τέτοιες συχνότητες (ή μήκη κύματος) ηλεκτρομαγνητικοί κυμάτων, ώστε να γίνονται αντιληπτά από το μάτι. Το μήκος κύματος των κυμάτων αυτών κυμαίνεται από 400nm έως και 700nm περίπου.

Επίσης εύκολα διαπιστώνουμε ότι το φως μεταφέρει ενέργεια (π.χ. ένα οποιοδήποτε σώμα, όταν εκτεθεί σε ηλιακή ακτινοβολία, θερμαίνεται). Η ενέργεια αυτή είναι ενέργεια ηλεκτρικού και ενέργεια μαγνητικού πεδίου, η οποία παράγεται από τις πηγές και μεταφέρεται ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

Την ορθότητα της θεωρίας του Maxwell απέδειξε πειραματικά ο Hertz (Χερτζ) το 1887, ο οποίος παρήγαγε, μέσω ταχέων ηλεκτρικών ταλαντώσεων, κύματα της ίδιας φύσης με αυτήν του φωτός αλλά με μικρότερη συχνότητα.

Η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος ( $c$ ), η συχνότητα ( $f$ ) και το μήκος κύματος ( $\lambda$ ) συνδέονται με τη σχέση  $c = \lambda f$ , η οποία ονομάζεται θεμελιώδης εξίσωση της κυματικής.

$$c = \lambda \cdot f \quad \text{Θεμελιώδης εξίσωση της κυματικής (3.1)}$$

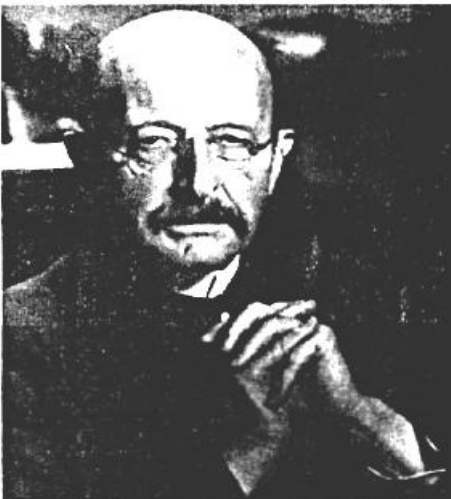
## Η σωματιδιακή φύση του φωτός.

### Θεωρία των κβάντα

Παρ' όλο που η κλασική θεωρία (αυτή που αναπτύχθηκε πριν από το 1922) του ηλεκτρομαγνητισμού ερμήνευσε ορισμένα φαινόμενα του φωτός, όπως η συμβολή, η περίθλαση, η πόλωση κ.ά., δεν κατόρθωσε να ερμηνεύσει κάποια άλλα φαινόμενα που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση της φωτεινής ακτινοβολίας με την ύλη.

Πολλά πειραματικά δεδομένα δεν μπορούσαν να ερμηνευτούν με την παραδοχή ότι το φως είναι μόνο κύμα. Το πιο σημαντικό από τα πειράματα αυτά ήταν εκείνο της μελέτης του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Για την ερμηνεία της εκπομπής και της απορρόφησης του φωτός δεν αρκούσαν μόνο κάποιες επεκτάσεις της κλασικής θεωρίας. Στην πραγματικότητα χρειάστηκε κάτι πιο ριζικό από μια απλή επέκταση.

Το 1900 ο Planck, για να ερμηνεύσει την ακτινοβολία που παράγει ένα θερμαινόμενο σώμα, εισήγαγε τη θεωρία των κβάντα φωτός, την οποία εφάρμοσε αργότερα ο Einstein, για να ερμηνεύσει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.



Max Planck  
(1858-1947).

Μία δέσμη φωτός αποτελείται από μικρά πακέτα ενέργειας, που ονομάζονται κβάντα φωτός ή φωτόνια.

Με τον όρο φωτοηλεκτρικό

**φαινόμενο** περιγράφουμε την εκπομπή ηλεκτρονίων από την επιφάνεια των μετάλλων, όταν προσπίπτει πάνω τους κατάλληλη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ορατή ή υπεριώδης, κτλ.

Ο όρος **κβάντα** προέρχεται από τη λατινική λέξη **quantum = ποσό**.

Σύμφωνα με την **κβαντική θεωρία του Planck**, το φως (και γενικότερα κάθε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) εκπέμπεται και απορροφάται από τα άτομα της ύλης όχι κατά συνεχή τρόπο αλλά **ασυνεχώς**. Δηλαδή κάθε άτομο εκπέμπει ή απορροφά στοιχειώδη ποσά ενέργειας, που ονομάζονται **κβάντα φωτός** ή **φωτόνια**. Από το άτομο λοιπόν δεν εκπέμπονται συνεχώς κύματα αλλά φωτόνια, καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη συχνότητα και έχει συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας **E**.

Όταν μια ποσότητα είναι κβαντωμένη, σημαίνει ότι παίρνει μόνο διακριτές (ορισμένες) τιμές, δηλαδή το σύνολο τιμών δεν είναι συνεχές. Ας θυμηθούμε το ηλεκτρικό φορτίο. Αυτό είναι κβαντωμένο, διότι δεν παίρνει οποιοσδήποτε τιμές, αλλά μόνο ακέραια πολλαπλάσια της τιμής του φορτίου ή ηλεκτρονίου:  **$1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$** .

Όταν το φως προσπίπτει πάνω στην ύλη, τα άτομα της ύλης απορροφούν την ακτινοβολία ασυνεχώς, που σημαίνει ότι κάθε άτομο απορροφά μεμονωμένα φωτόνια. Κάθε φωτόνιο μιας ακτινοβολίας έχει ενέργεια που δίνεται από τη σχέση  **$E = h \cdot f$** .

$$E = h \cdot f \quad \text{Ενέργεια φωτονίου} \quad (3.2)$$

Το  $h$  είναι μια σταθερά, που ονομάζεται **σταθερά του Planck**, και έχει τιμή  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  και  $f$  η συχνότητα.

Όταν προσπίπτει φως πάνω στα μέταλλα, τότε μεταφέρεται ενέργεια από ένα φωτόνιο σε ένα από τα ηλεκτρόνια του ατόμου του μετάλλου. Δηλαδή το ηλεκτρόνιο αλληλεπιδρά με ένα από τα φωτόνια του φωτός σαν να είναι το φωτόνιο σωματίδιο.

Η θεωρία των κβάντα δεν αναιρεί την κυματική φύση του φωτός. Το φωτόνιο έχει και κυματικές ιδιότητες, για παράδειγμα η ενέργειά του εξαρτάται από τη συχνότητα του, που είναι κατ' εξοχήν κυματική ιδιότητα.

### 3.2 Η ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Επειδή το φως διαδίδεται στο κενό και στον αέρα με πολύ μεγάλη ταχύτητα, περίπου  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ , οι πρώτες προσπάθειες για τη μέτρησή της απέτυχαν.

Ο Γαλιλαίος ήταν από τους πρώτους που προσπάθησε να μετρήσει την ταχύτητα του φωτός χρησιμοποιώντας απλά μέσα για την εποχή εκείνη. Έτσι τοποθέτησε δύο παρατηρητές πάνω σε δύο πύργους των τειχών της Πίζας, οι οποίοι απείχαν μεταξύ τους 5 μίλια. Κάθε παρατηρητής κρατούσε από ένα φανάρι που ήταν κλειστό και, όποτε χρειαζόταν, άνοιγε το παραθυράκι. Όταν ο πρώτος άνοιγε το παραθυράκι του φαναριού του, ο δεύτερος ήταν συνεννοημένος να ανοίξει το δικό του αμέσως μόλις έβλεπε το φως τον πρώτον.

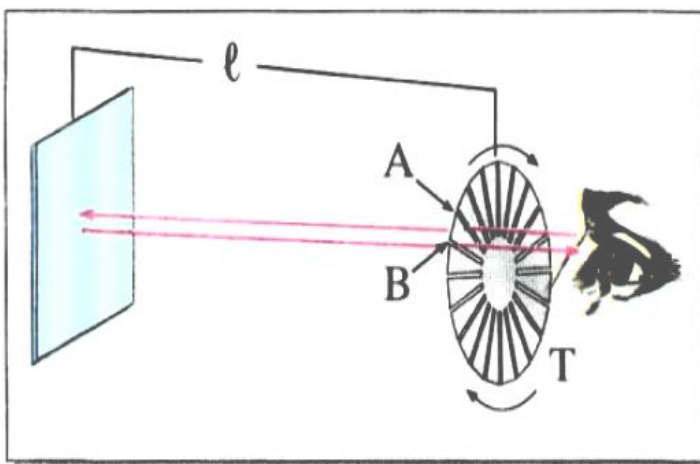
Αν λοιπόν μετρούσε κανείς το χρόνο που περνούσε από τη στιγμή που ο πρώτος άνοιγε το παραθυράκι έως τη στιγμή που έβλεπε το φως του δεύτερου παρατηρητή (και με γνωστή τη μεταξύ τους απόσταση), με μια απλή διαίρεση θα μπορούσε να μετρήσει την ταχύτητα του φωτός. Όμως ο χρόνος αντίδρασης των

δύο παρατηρητών ήταν πολύ μεγαλύτερος από το χρόνο που χρειαζόταν το φως για να διανύσει τη μεταξύ τους απόσταση και έτσι η μέθοδος αυτή δεν ήταν εφαρμόσιμη και οδήγησε σε αποτυχία. Έδειξε όμως ότι η ταχύτητα του φωτός είναι τόσο μεγάλη, ώστε είναι αδύνατο να μετρηθεί με τέτοια χονδροειδή μηχανικά μέσα.

Οι πρώτες επιτυχείς μέθοδοι για τη μέτρηση της ταχύτητας του φωτός ήταν βασισμένες σε αστρονομικές παρατηρήσεις. Πρώτος μέτρησε χονδρικά την ταχύτητα του φωτός ο Δανός αστρονόμος Ole Roemer (Όλε Ρέμερ, 1644-1710). Ο Roemer υπολόγισε ότι η τιμή της ταχύτητας του φωτός είναι περίπου  $2 \times 10^8 \text{ m/s}$ . Η μέτρηση αυτή έχει ιστορική αξία, διότι, εκτός του ότι προσέγγιζε αρκετά την πραγματική τιμή της ταχύτητας, έδειξε για πρώτη φορά ότι η ταχύτητα του φωτός έχει πεπερασμένη τιμή.

### Η μέθοδος του Fizeau

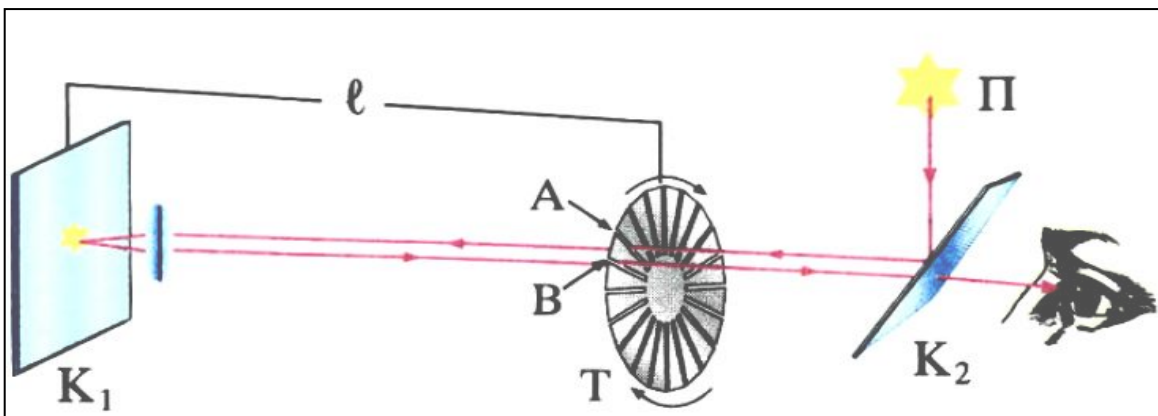
Το 1849 ο H.L. Fizeau (Φιζό), ένας Γάλλος φυσικός, κατάφερε να μετρήσει την ταχύτητα του φωτός με απλά μηχανικά μέσα. Στο παρακάτω σχήμα παριστάνεται μια απλουστευμένη μορφή της διάταξης που χρησιμοποίησε. Η βασική ιδέα της μεθόδου ήταν να μετρηθεί ο χρόνος που χρειάζεται το φως, για να



διανύσει την απόσταση «πήγαινε - έλα» μεταξύ μιας φωτεινής πηγής Π και ενός κατόπτρου  $K_1$ , που βρισκόταν σε μεγάλη απόσταση από την πηγή (σχήμα 3.2-3).



Η ακτίνα που προέρχεται από τη φωτεινή πηγή  $\Pi$  ανακλάται στο «ημιεπαργυρωμένο κάτοπτρο»  $K_2$  και, αφού διανύσει την απόσταση  $\ell$ , προσπίπτει στο κάτοπτρο  $K_1$ . Η ανακλώμενη ακτίνα επιστρέφει από την ίδια διαδρομή, μεταφέροντας το είδωλο της πηγής  $\Pi$ , οπότε γίνεται αντιληπτή από κάποιο παρατηρητή που βρίσκεται πίσω από το  $K_2$ . Μεταξύ του παρατηρητή και του κατόπτρου  $K_1$  παρεμβάλλεται οδοντωτός τροχός  $T$ , ο οποίος περιστρέφεται με τέτοιο τρόπο, ώστε άλλοτε η ακτίνα φως να διακόπτεται και άλλοτε όχι. Όταν ο τροχός περιστρέφεται αργά, ο παρατηρητής θα βλέπει φως και σκοτάδι. Αυξάνοντας διαρκώς την ταχύτητα του τροχού θα έλθει η στιγμή που ο παρατηρητής δε θα βλέπει φως.



**Εικόνα 3.2-3** Στο πείραμα Fizeau, που εικονίζεται δίπλα, η απόσταση  $\ell$  μεταξύ του οδοντωτού τροχού  $T$  και του κατόπτρου  $K_1$  ήταν περίπου 8630m ή 5,36miles. Απλοποιήσαμε τη διάταξη παραλείποντας τη σειρά των φακών και κατόπτρων που χρησιμοποίησε ο Fizeau.

Αυτό θα συμβεί, όταν το φως, που θα διέλθει από το διάκενο  $A$  του τροχού, αφού ανακλαστεί στο κάτοπτρο  $K_1$ , συναντήσει το επόμενο δόντι του τροχού.

Αν αυξήσουμε ακόμα περισσότερο την ταχύτητα του τροχού, το φως θα γίνει πάλι ορατό, γιατί θα διέλθει από το επόμενο διάκενο  $B$ . Ας υποθέσουμε τώρα ότι ο τροχός έχει  $N$  δόντια και περιστρέφεται με συχνότητα  $f$

(στροφές ανά δευτερόλεπτο). Τότε ο χρόνος  $t$ , για να περιστραφεί ο τροχός κατά ένα δόντι, είναι:

$$t = \frac{\text{χρόνος μιας περιστροφής}}{\text{αριθμός δοντιών}} = \frac{T}{N} = \frac{\frac{1}{f}}{N} = \frac{1}{f \cdot N} \quad (1)$$

Στο χρόνο αυτό το φως έχει διανύσει την απόσταση  $2\ell$  «πήγαινε - έλα». Άρα η ταχύτητα του φωτός θα είναι:

$$c = \frac{\text{απόσταση}}{\text{χρόνος}} = \frac{2\ell}{t} \text{ και λόγω της (1) } c = 2\ell \cdot f \cdot N \quad (1.3)$$

Με γνωστά τα μεγέθη  $\ell$ ,  $f$ ,  $N$  υπολογίζουμε την ταχύτητα  $c$ .

Το τέχνασμα της «διακοπτόμενης δέσμης», τροποποιούμενο κατάλληλα, χρησιμοποιείται σήμερα για τη μέτρηση της ταχύτητας των νετρονίων και άλλων σωματιδίων.

Ο Fizeau γνώριζε την απόσταση  $\ell$ , τον αριθμό των δοντιών του τροχού και τη συχνότητα περιστροφής και έτσι υπολόγισε ότι το μέτρο της ταχύτητας του είναι  $3,1 \times 10^8 \text{ m/s}$ . Ακριβέστερα πειράματα που έγιναν αργότερα, έδωσαν την τιμή  $2,9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ .

Για την ταχύτητα του φωτός γνωρίζουμε σήμερα ότι:

- Το φως, όπως και κάθε ηλεκτρομαγνητικό κύμα, διαδίδεται στο κενό με σταθερή ταχύτητα περίπου  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ .
- Η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι μια θεμελιώδης σταθερά της φύσης.
- Η ταχύτητα του φωτός έχει την ίδια τιμή σε όλα τα συστήματα αναφοράς και είναι ανεξάρτητη από την κίνηση της φωτεινής πηγής (αξίωμα του Einstein).

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3 – 1

Υποθέτουμε ότι ο οδοντωτός τροχός του πειράματος Fizeau έχει 360 δόντια. Αυξάνοντας διαρκώς (έχουμε



αρχίσει από το μηδέν) τη συχνότητα περιστροφής του τροχού, ο παρατηρητής βλέπει συνεχώς, για κάποια τιμή συχνότητας, το είδωλο της φωτεινής πηγής. Υπολογίστε τη συχνότητα και την περίοδο περιστροφής του τροχού.

**ΛΥΣΗ** Χρησιμοποιώντας τη σχέση 1.3 υπολογίζουμε πρώτα τη συχνότητα περιστροφής.

Έχουμε:  $c = 2\ell \cdot f \cdot N$ , οπότε  $f = \frac{c}{2\ell N} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2 \cdot 8630 \text{ m} \cdot 360}$

ή  $f = 48,28 \text{ Hz}$ .

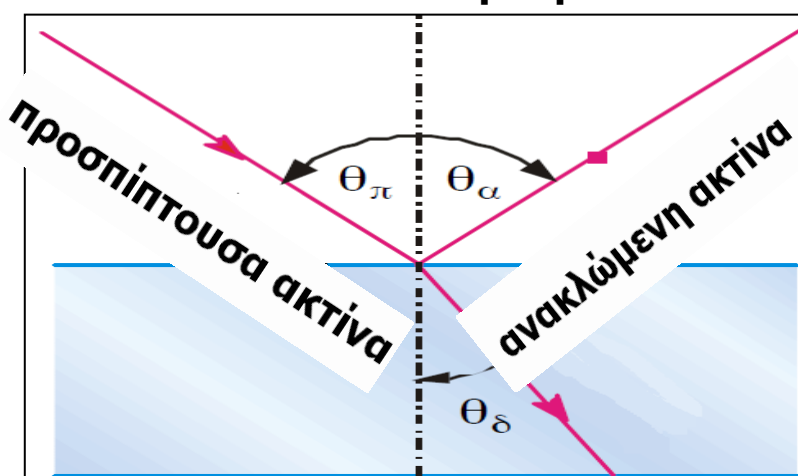
Η περίοδος δίνεται από τη σχέση  $T = 1 / f$ .

Άρα:  $T = \frac{1}{48,28} \text{ s} = 0,0207 \text{ s}$

### 3.3 ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ

#### Ανάκλαση και διάθλαση του φωτός

Όταν μία φωτεινή δέσμη, που διαδίδεται σε ένα μέσο, συναντήσει τη διαχωριστική επιφάνεια που χωρίζει το αρχικό μέσο διάδοσης από ένα άλλο οπτικό μέσο, τότε ένα μέρος της ανακλάται προς το αρχικό μέσο διάδοσης, ενώ ένα άλλο μέρος συνεχίζει να διαδίδεται στο δεύτερο μέσο. Στο σχήμα 3-4α βλέπουμε



πώς ανακλώνται οι ακτίνες, όταν προσπίπτουν σε μια λεία επιφάνεια, για παράδειγμα από τον αέρα στην επιφάνεια ενός γυαλιού.

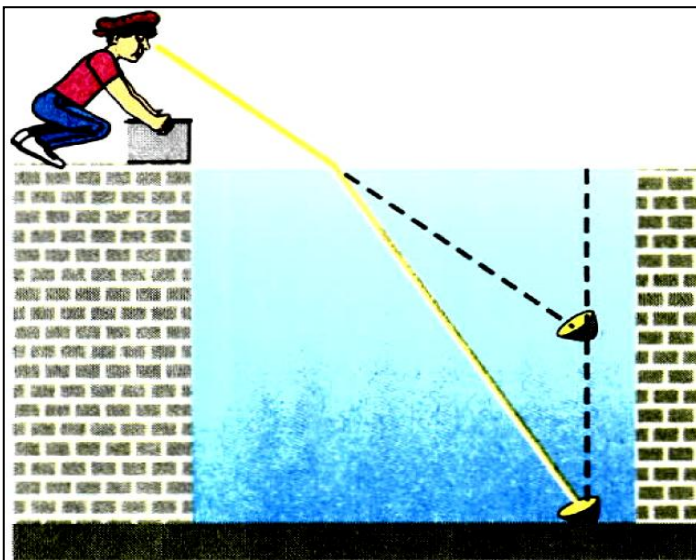
**Εικόνα 3.3-4α** Ανάκλαση και διάθλαση από οπτικά αραιότερο σε οπτικό πυκνότερο μέσο.  $\theta_{\pi}$  είναι η γωνία

πρόσπτωσης,  $\theta\delta$  η γωνία διάθλασης και  $\theta\alpha$  η γωνία ανάκλασης. Ισχύει:  $\theta\delta < \theta\alpha$ .

Η προσπίπτουσα και η ανακλώμενη ακτίνα σχηματίζουν, στο σημείο ανάκλασης, γωνίες  $\theta\pi$  και  $\theta\alpha$ , αντίστοιχα, με την κάθετο προς την ανακλώσα επιφάνεια. Πειραματικά αποδεικνύεται ότι  $\theta\pi = \theta\alpha$ .

Οι ακτίνες που εισέρχονται στο γυαλί αλλάζουν διεύθυνση διάδοσης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διάθλαση. Όταν οι ακτίνες εισέρχονται από τον αέρα στο γυαλί, τότε οι διαθλώμενες ακτίνες πλησιάζουν την κάθετο στη διαχωριστική επιφάνεια (σχήμα 3.3-4α), ενώ, όταν εισέρχονται από το γυαλί στον αέρα, απομακρύνονται από την κάθετο.

Στο πείραμα του σχήματος 3.3-4β βλέπουμε ότι οι ακτίνες φακός που εκπέμπονται από μία φωτεινή πηγή η οποία βρίσκεται στον πυθμένα της πισίνας, όταν εξέρχονται από το νερό στον αέρα, εκτρέπονται από την πορεία τους και μας κάνουν να βλέπουμε τη φωτεινή πηγή πιο ψηλά από ό,τι πραγματικά βρίσκεται.



φωτός.

**Εικόνα 1-4β** Το φως, κατά τη διάδοση του σε δύο διαφορετικά οπτικά μέσα αλλάζει διεύθυνση διάδοσης. Έτσι αντικείμενα ορατά στο μάτι φαίνονται τελικά ότι προέρχονται από διαφορετική θέση. Το φαινόμενο οφείλεται στη διάθλαση του

**Ταχύτητα και μήκος κύματος του φωτός μέσα στην ύλη**

Ο λόγος για τον οποίο το φως διαθλάται, καθώς διέρχεται από το ένα υλικό μέσο στο άλλο, είναι ότι η ταχύτητά του έχει διαφορετικές τιμές στα δύο μέσα.

Το φως διαδίδεται στο κενό με ταχύτητα  $c_0 = 3 \times 10^8$  m/s. Μέσα όμως σε κάποιο υλικό η ταχύτητα του φωτός είναι πάντα μικρότερη από τη  $c_0$ . Για διευκόλυνσή μας ορίζουμε ένα συντελεστή που ισούται με το πηλίκο της ταχύτητας  $c_0$  του φωτός στο κενό προς την ταχύτητα  $c$  μέσα σε κάποιο υλικό και ονομάζεται δείκτης διάθλασης  $n$  του υλικού μέσου. Ισχύει δηλαδή:

$$n = \frac{\text{ταχύτητα του φωτός στο κενό}}{\text{ταχύτητα του φωτός στο μέσο}} = \frac{c_0}{c} \quad (3.4)$$

Επειδή η ταχύτητα του φωτός μέσα σε ένα υλικό είναι πάντα μικρότερη από την ταχύτητά του στο κενό, από τον ορισμό προκύπτει ότι ο δείκτης διάθλασης για οποιοδήποτε υλικό είναι πάντα μεγαλύτερος από τη μονάδα, ενώ για το κενό ισχύει  $n = 1$ .

Όταν το φως διαπερνά μία διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων (π.χ. από τον αέρα στο γυαλί), η συχνότητα  $f$  παραμένει αμετάβλητη. Τούτο γίνεται σαφές, αν σκεφτούμε το εξής: το φως είναι κύμα, άρα ο αριθμός των μηκών κύματος που προσπίπτουν στη διαχωριστική επιφάνεια, ανά μονάδα χρόνου, είναι ίσος με τον αριθμό των μηκών κύματος που διέρχονται από αυτήν ανά μονάδα χρόνου. Αν δε συνέβαινε αυτό, η διαχωριστική επιφάνεια έπρεπε να δημιουργεί νέα κύματα ή να εξαφανίζει τα ήδη υπάρχοντα. Δεν έχει παρατηρηθεί όμως τέτοιος μηχανισμός, που σημαίνει ότι η συχνότητα παραμένει σταθερή, καθώς το φως διέρχεται από τη διαχωριστική επιφάνεια.

Εφαρμόζοντας τη θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής έχουμε διαδοχικά:  $c_0 = \lambda_0 \cdot f$  για το κενό και  $c = \lambda \cdot f$  για

οπτικό μέσο διαφορετικό του κενού. Διαιρώντας τις δύο σχέσεις κατά μέλη προκύπτει:

$$\frac{c_0}{c} = \frac{\lambda_0}{\lambda} \text{ και λόγω της 1.4, είναι : } n = \frac{\lambda_0}{\lambda} \text{ Τελικά ισχύει:}$$

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (3.5)$$

Η τελευταία σχέση μάς πληροφορεί ότι φως με μήκος κύματος  $\lambda_0$  στο κενό υφίσταται μεταβολή του μήκους κύματος του, όταν εισέρχεται σε ένα μέσο με δείκτη διάθλασης  $n$ .

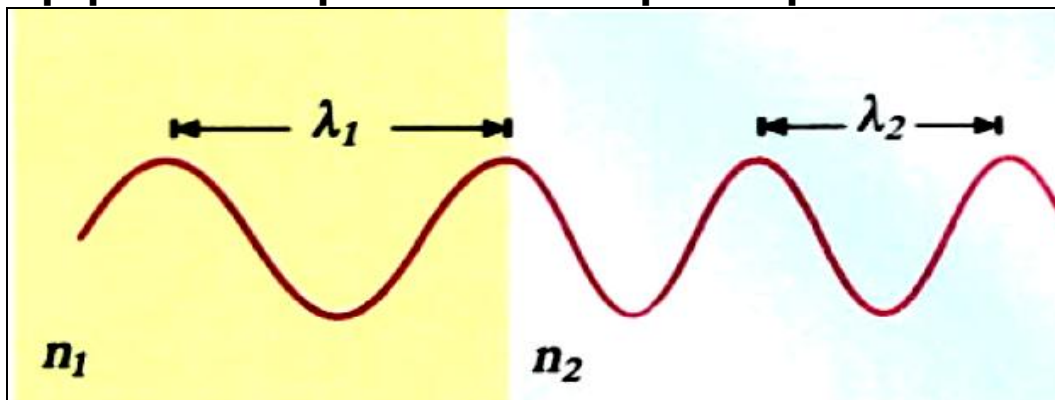
Ας δούμε τι συμβαίνει, όταν το φως διαδίδεται σε δύο διαφορετικά υλικά με δείκτες διάθλασης  $n_1$  και  $n_2$ , αντίστοιχα, με  $n_2 > n_1$ . Εφαρμόζοντας την 3.5 για τα δύο οπτικά μέσα, έχουμε:

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_0}{n_1} \quad (1) \quad \text{και} \quad \lambda_2 = \frac{\lambda_0}{n_2} \quad (2)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις εξισώσεις (1) και (2) έχουμε:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1} \text{ και, επειδή } n_2 > n_1, \text{ προκύπτει } \lambda_1 > \lambda_2$$

Η τελευταία ανισότητα μας πληροφορεί ότι το μήκος κύματος στο οπτικά πυκνότερο μέσο, δηλαδή στο μέσο που έχει μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης, έχει μικρότερη τιμή από αυτή στο οπτικά αραιότερο.



**3.3-4γ** Εικόνα που δείχνει τη μείωση του μήκους κύματος, όταν το φως διέρχεται από οπτικά αραιότερο σε οπτικά πυκνότερο μέσο. Ισχύει στην περίπτωση αυτή  $n_2 > n_1$ , και  $\lambda_2 < \lambda_1$ . Το οπτικά πυκνότερο μέσο είναι αυτό που έχει το μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης

Επειδή για το κενό είναι εξ ορισμού  $n = 1$ , γίνεται κατανοητό ότι το μήκος κύματος θα έχει τη μεγαλύτερη τιμή  $\lambda_0$  στο κενό. Ως μονάδα μέτρησης του μήκους κύματος για το ορατό φως χρησιμοποιείται υποπολλαπλάσιο του 1m, το 1νανόμετρο ( $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ ).

Συμπερασματικά λοιπόν μπορούμε να πούμε ότι: όταν το φως διαδίδεται σε ένα οπτικό μέσο, διατηρεί αμετάβλητα την ταχύτητα ( $c$ ), το μήκος κύματος ( $\lambda$ ) και τη συχνότητα ( $f$ ), ενώ, όταν αλλάζει οπτικό μέσο, τότε αλλάζουν τα μεγέθη  $c$  και  $\lambda$ , αλλά διατηρείται σταθερό το  $f$ , που είναι και η συχνότητα της πηγής που παράγει το φως.

**Πίνακας 3.1. Δείκτες διάθλασης διάφορων υλικών που έχουν υπολογιστεί με φως μήκους κύματος  $\lambda_0 = 589\text{nm}$  (κίτρινο χρώμα του νατρίου στο κενό).**

Υλικό	Δείκτης Διάθλασης
<b>Αέρια (0°C, 1Atm)</b>	
Αέρας	1,000293
Διοξείδιο του άνθρακα (CO <sub>2</sub> )	1,00045
<b>Στερεά</b>	
Πάγος (H <sub>2</sub> O)	1,309
Ορυκτό άλας (NaCl)	1,544
Χαλαζίας (SiO <sub>2</sub> )	1,544
Φθορίτης (CaF <sub>2</sub> )	1,434
Ορυκτό ζιρκόνιο (ZrO <sub>2</sub> · SiO <sub>2</sub> )	1,923
Αδάμας (C)	2,417
Ύαλοι (τυπικές τιμές)	1,5 - 1,9
<b>Υγρά σε θερμοκρασία 20°C</b>	
Μεθανόλη (CH <sub>3</sub> OH)	1,329
Νερό (H <sub>2</sub> O)	1,333
Αιθανόλη (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH)	1,360
Τετραχλωράνθρακας (CCl <sub>4</sub> )	1,460
Γλυκερίνη	1,473

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1 – 2

Υπολογισμός του δείκτη διάθλασης στο εσωτερικό του ανθρώπινου ματιού: Φωτεινή ακτίνα μήκους κύματος  $\lambda_0 = 589\text{nm}$ , που παράγεται από λυχνία νατρίου, προσπίπτει από τον αέρα σε ανθρώπινο μάτι. Στο υδατοειδές υγρό μέσα στο βολβό του ματιού το μήκος κύματος έχει τιμή  $\lambda = 439\text{nm}$ . Να υπολογίσετε το δείκτη διάθλασης του υδατοειδούς υγρού, καθώς και την ταχύτητα και τη συχνότητα της φωτεινής ακτίνας στο υγρό αυτό.

**ΛΥΣΗ:** Χρησιμοποιούμε τη σχέση 1.5. Με το σκεπτικό ότι ο δείκτης διάθλασης του αέρα είναι περίπου ένα, τα μήκη κύματος στον αέρα και στο κενό έχουν την ίδια τιμή  $\lambda_0$ . Άρα:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \Rightarrow n = \frac{\lambda_0}{\lambda} \Rightarrow \frac{589\text{nm}}{439\text{nm}} \Rightarrow n = 1,34$$

Βλέποντας τον πίνακα 1.1 διαπιστώνουμε ότι ο δείκτης διάθλασης  $n$  έχει περίπου την ίδια τιμή με το νερό.

Ας βρούμε την ταχύτητα τώρα. Ισχύει  $n = \frac{c_0}{c} \Rightarrow$

$$c = \frac{c_0}{n} \Rightarrow c = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,34} \Rightarrow c = 2,24 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Τέλος, από τη σχέση  $c = \lambda f$ , έχουμε διαδοχικά:

$$c = \lambda f \Rightarrow c = \frac{c}{\lambda} = \frac{2,24 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{439 \text{ nm}} \Rightarrow f = 5,1 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

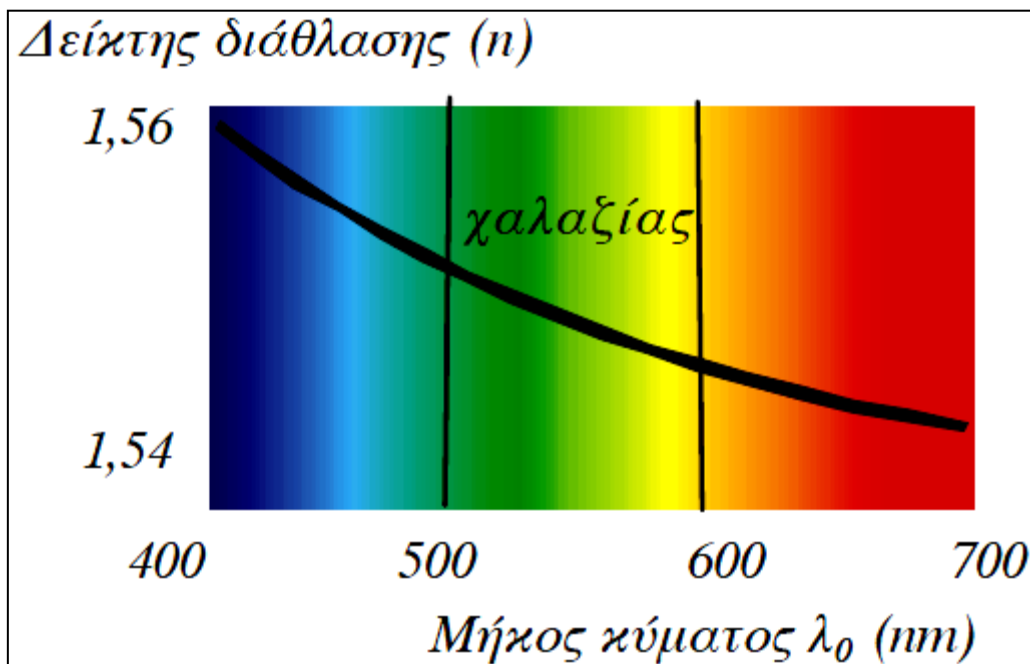
## 3.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΥΚΟΥ ΦΩΤΟΣ ΚΑΙ ΧΡΩΜΑΤΑ

### Διασκεδασμός και πρίσματα

Στην προηγούμενη υποενότητα είδαμε ότι η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι ίδια για όλα τα μήκη κύματος. Σε ένα υλικό οπτικό μέσο η ταχύτητα του φωτός είναι διαφορετική για διαφορετικά μήκη κύματος. Ο δείκτης



διάθλασης του μέσου δεν είναι σταθερός, αλλά εξαρτάται από το μήκος κύματος του φωτός.



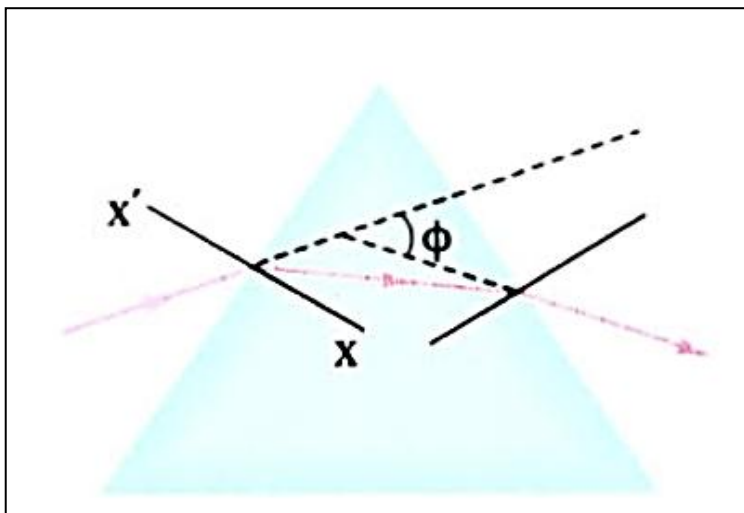
### 3.4-5 Εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος.

Το φαινόμενο αυτό, δηλαδή η εξάρτηση της ταχύτητας του φωτός και του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος, ονομάζεται διασκεδασμός. Στο σχήμα 3.4-5 απεικονίζεται η εξάρτηση του δείκτη διάθλασης ενός οπτικού υλικού (χαλαζία) από το μήκος κύματος  $\lambda_0$  στο κενό. Η τιμή του  $n$ , όπως βλέπουμε, μειώνεται, καθώς αυξάνεται η τιμή του μήκους κύματος. Φως μεγαλύτερου μήκους κύματος έχει μεγαλύτερη ταχύτητα σε ένα μέσο από φως μικρότερου μήκους κύματος.

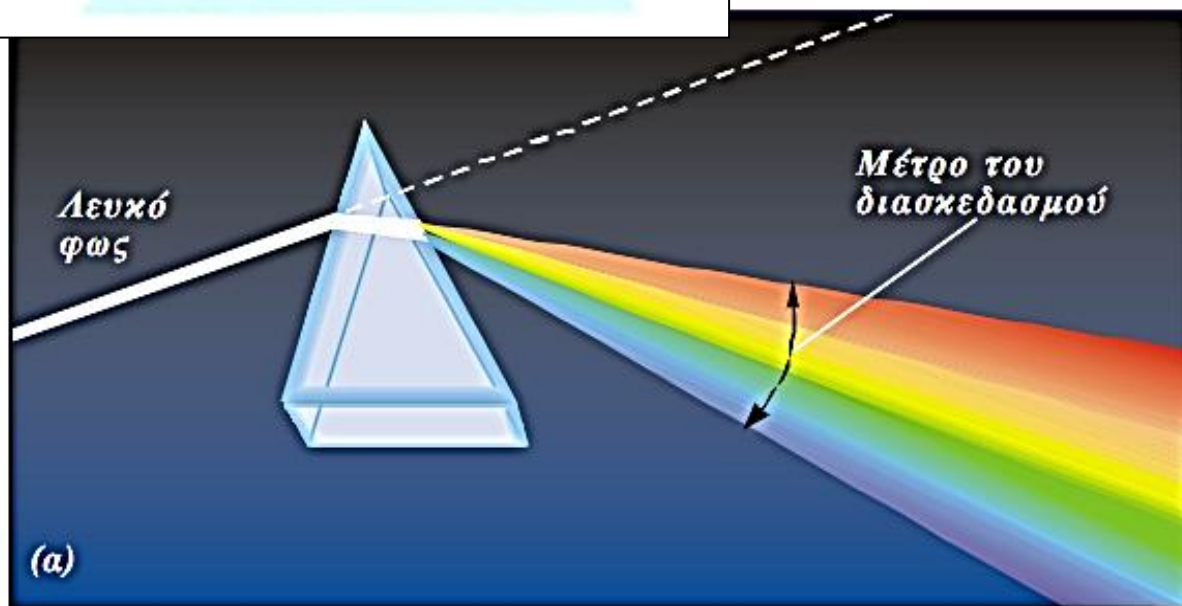
#### Ανάλυση του λευκού φωτός

Για να κατανοήσουμε το φαινόμενο ανάλυσης του λευκού φωτός, ας δούμε αρχικά πώς προκαλείται η εκτροπή (αλλαγή κατεύθυνσης) μιας μονοχρωματικής ακτίνας φωτός από ένα πρίσμα. Στο σχήμα 3.4-6 έχουμε μία τέτοια ακτίνα φωτός, που προσπίπτει πλάγια στην αριστερή επιφάνεια ενός πρίσματος. Επειδή ο δείκτης

διάθλασης του πρίσματος είναι μεγαλύτερος από το δείκτη διάθλασης του οπτικού μέσου που τον περιβάλλει, η ακτίνα διαθλάται προσεγγίζοντας την κάθετη  $x x'$ , ενώ, όταν η ακτίνα εξέρχεται από το πρίσμα, απομακρύνεται από την κάθετη. Βλέπουμε ότι η εξερχόμενη ακτίνα έχει εκτραπεί τελικά από την αρχική της πορεία κατά γωνία  $\phi$ . Η γωνία  $\phi$  ονομάζεται γωνία εκτροπής.

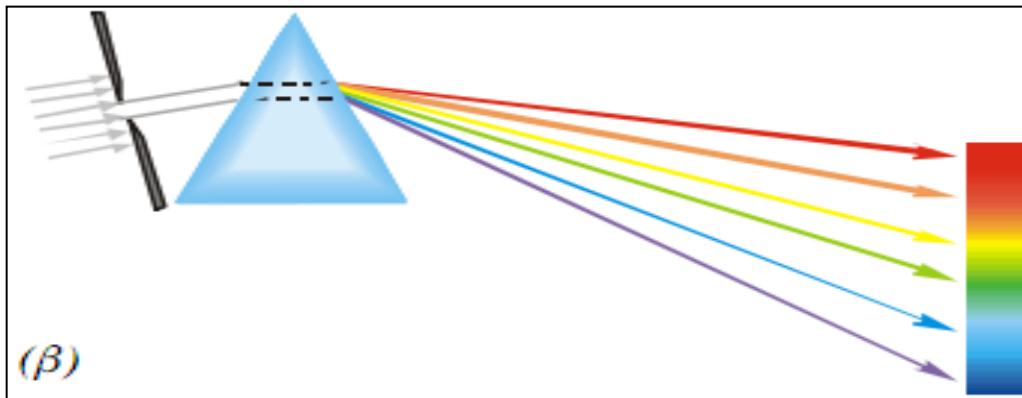


**3.4-6** Ακτίνα φωτός που διαθλάται από πρίσμα εκτρέπεται κατά γωνία  $\phi$ .



**3.4-7** (α) Απεικόνιση του διασκεδασμού που προκαλείται σε δέσμη λευκού φωτός από ένα πρίσμα. Η ταινία των εξερχόμενων χρωμάτων ονομάζεται φάσμα.





### 3.4-7 (β) Τα βασικά χρώματα του φάσματος.

Έστω τώρα ότι έχουμε μία δέσμη λευκού φωτός που προσπίπτει πάνω σε ένα πρίσμα (σχήμα 3.4-7α). Οι ακτίνες που εξέρχονται από το πρίσμα εκτρέπονται και διασκορπίζονται στο χώρο εξόδου, ενώ ταυτόχρονα το λευκό φως αναλύεται σε μία πολύχρωμη συνεχή ταινία, που περιλαμβάνει γνωστά χρώματα. Η ταινία αυτή ονομάζεται **φάσμα του λευκού φωτός**.

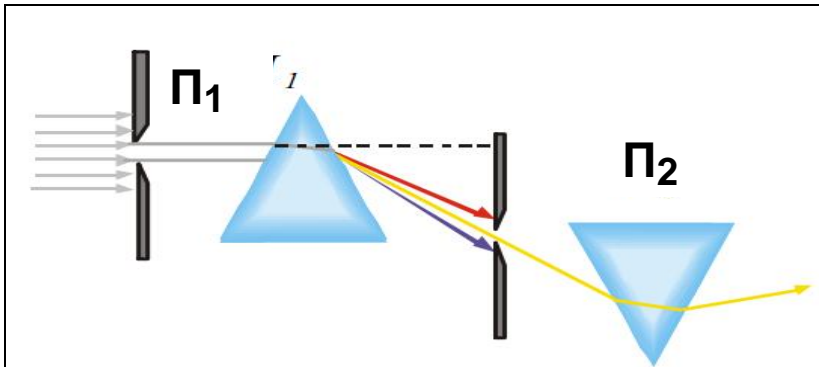
Το φαινόμενο «διασκεδασμός» μελετήθηκε για πρώτη φορά το 17ο αιώνα από το Ρενέ Ντεκάρτ και το Νεύτωνα.

Ο Νεύτωνας προσπάθησε να αναλύσει περαιτέρω τις μονοχρωματικές ακτίνες του φάσματος σε άλλες απλούστερες, αλλά δεν τα κατάφερε. Το μόνο που παρατήρησε ήταν ότι το χρώμα διαχεόταν περισσότερο, αλλά παρέμενε ως έχει.

Τα χρώματα του φάσματος, κατά σειρά μείωσης του μήκους κύματος, είναι: ερυθρό, πορτοκαλί, κίτρινο, πράσινο, κυανό και ιώδες (σχήμα 3.4-7β). Τα χρώματα αυτά δεν αναλύονται σε άλλα απλούστερα και, αν τα ανασυνθέσουμε, θα αναπαράγαμε το λευκό φως.

Παρατηρώντας την εικόνα του σχήματος 3.4-7β βλέπουμε ότι οι ιώδεις ακτίνες εκτρέπονται περισσότερο, ενώ οι ερυθρές λιγότερο από τις άλλες που βρίσκονται ανάμεσά τους. Αυτό μας οδηγεί στο

συμπέρασμα ότι η γωνία εκτροπής εξαρτάται από το μήκος κύματος κάθε χρώματος.



3.4-8 Το μονοχρωματικό φως δεν αναλύεται σε άλλες απλούστερες ακτινοβολίες. Το πρίσμα Π1 αναλύει το λευκό φως, όμως το Π2 απλώς εκτρέπει την κίτρινη ακτίνα.

Συμπερασματικά, το φως εμφανίζει τα εξής χαρακτηριστικά σε σχέση με τη διάδοσή του σε οπτικά μέσα:

- Κάθε μονοχρωματική ακτίνα φωτός, όταν διαδίδεται σε ένα συγκεκριμένο οπτικό μέσο, χαρακτηρίζεται από ένα μοναδικό μήκος κύματος, που είναι η ταυτότητα του χρώματος για το μέσο αυτό.

- Ο δείκτης διάθλασης του οπτικού μέσου έχει διαφορετική τιμή για κάθε χρώμα (πίνακας 3.2).

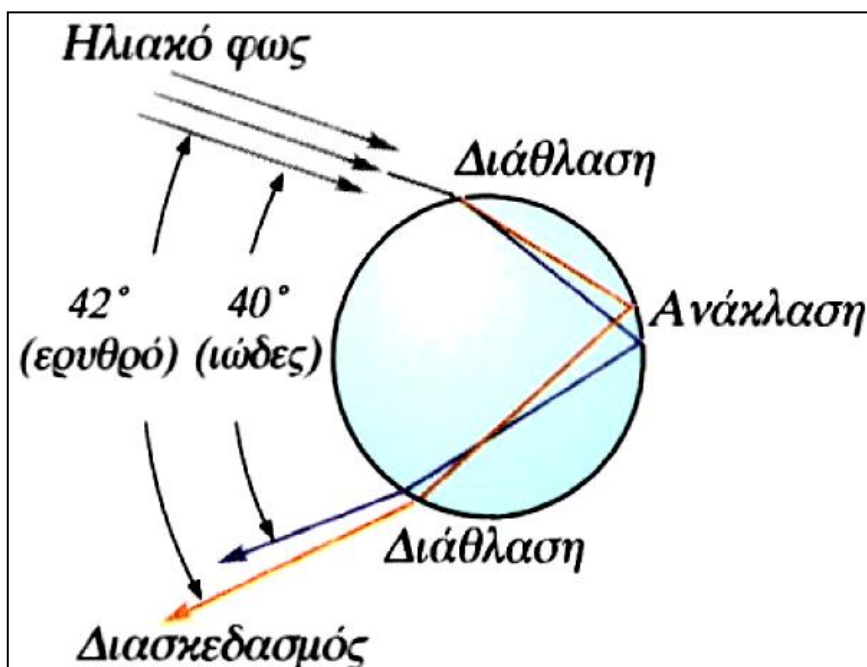
- Η γωνία εκτροπής κάθε χρώματος, όταν αυτό διέρχεται από οπτικό μέσο, εξαρτάται από το μήκος κύματος του χρώματος και όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος τόσο μικρότερη είναι η γωνία εκτροπής.

Η Αντίληψη ενός χρώματος παραμένει η ίδια σε οποιοδήποτε μέσο διάδοσης. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η συχνότητα, η οποία είναι υπεύθυνη για το ερέθισμα στο μάτι, είναι αμετάβλητη σε όλα τα μέσα διάδοσης του φωτός. Δηλαδή το κόκκινο χρώμα φαίνεται κόκκινο απ' όσα οπτικά μέσα και αν περάσει το φως πριν φτάσει στο μάτι.

Πίνακας 1.2 Δείκτης διάθλασης στεφανύαλου	
Χρώμα	Δείκτης διάθλασης
Ιώδες	1,532
Μπλε	1,528
Πράσινο	1,519
Κίτρινο	1,517
Πορτοκαλί	1,514
Κόκκινο	1,513

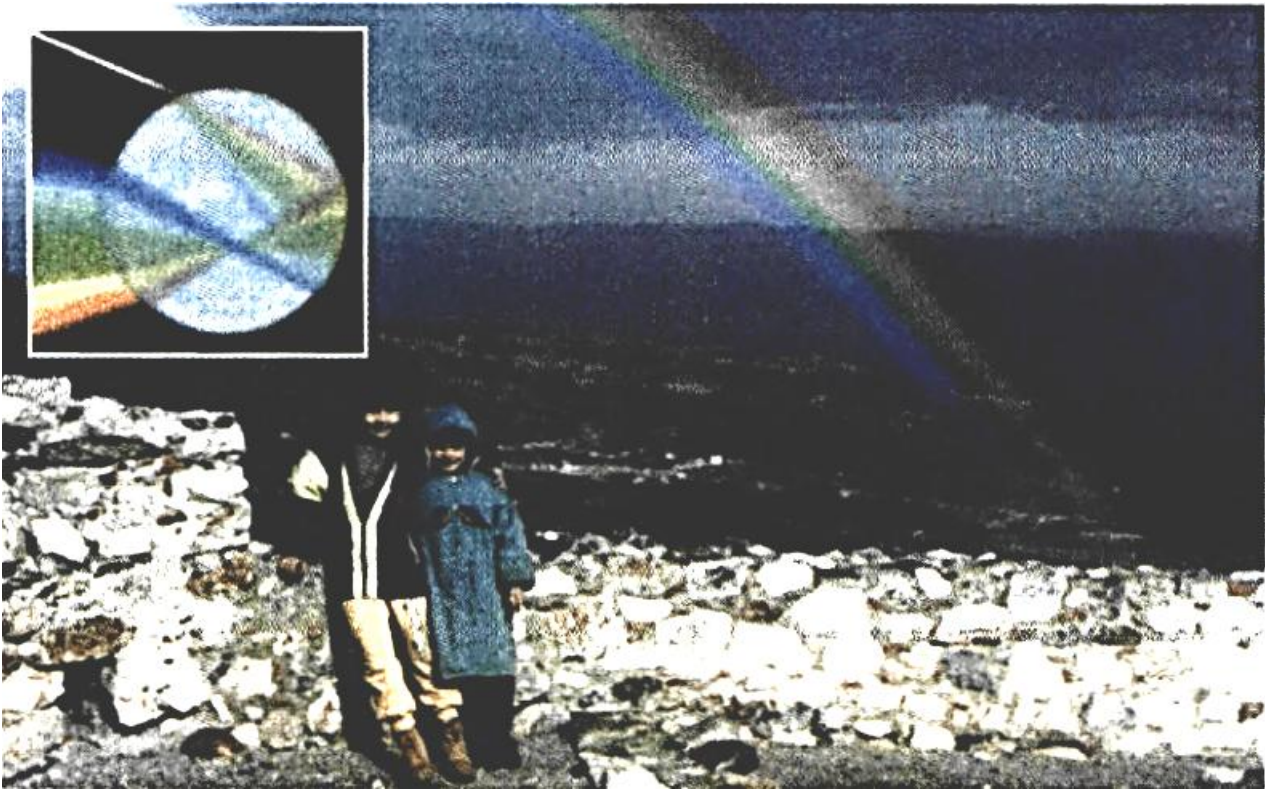
### Ουράνιο τόξο - Τα χρώματα της φύσης

Έχουμε παρατηρήσει πολλές φορές, τις βροχερές μέρες με λίγο Ήλιο, να εμφανίζεται στον ουρανό το ουράνιο τόξο. Εκείνη τη στιγμή η φύση συνδυάζει δύο φαινόμενα, το διασκεδασμό και την ολική ανάκλαση, και μας δίνει την ευκαιρία να χαρούμε την ωραιότητα των αποτελεσμάτων του συνδυασμού αυτού. Το φως, όπως έρχεται πίσω από τον παρατηρητή, αφού διαθλαστεί και υποστεί ολική ανάκλαση στις μικρές σταγόνες της βροχής, εξέρχεται από αυτές και κατευθύνεται προς τα μάτια του. Ο διασκεδασμός

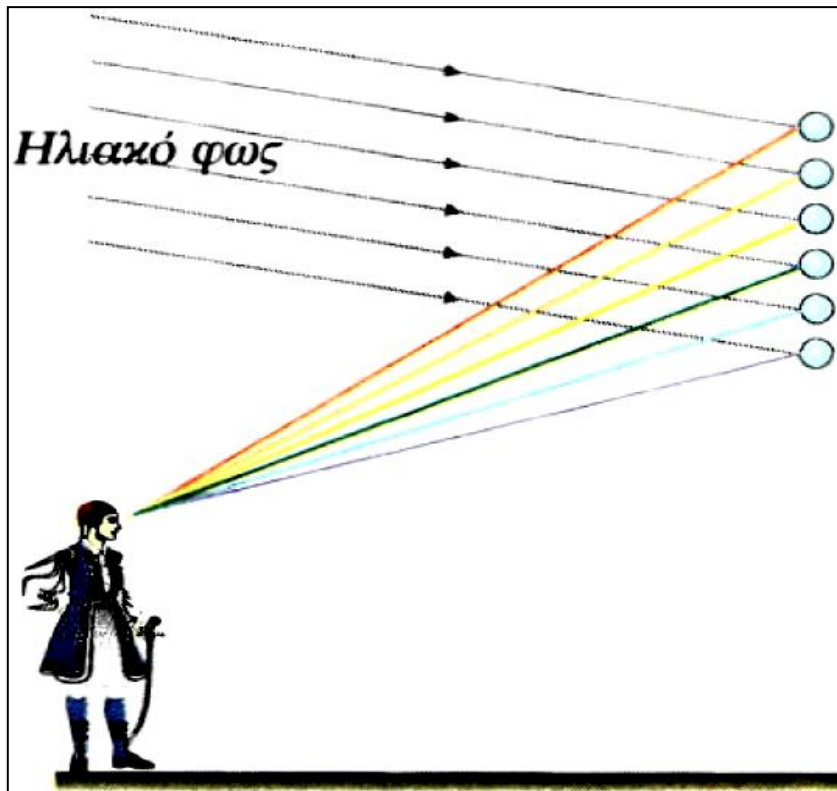


προκαλεί τη διάθλαση των χρωμάτων σε διαφορετικές γωνίες και έτσι έχουμε την ανάλυση του φωτός στα χρώματα της ίριδας.

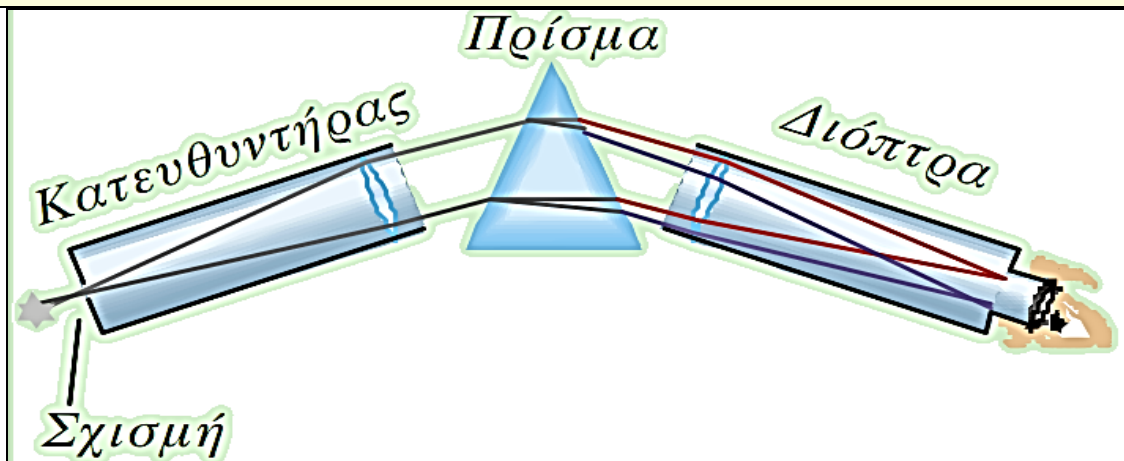
### 3.4-9 Διάθλαση ηλιακού φωτός σε σταγόνα βροχής.



3.4-10 Η Ισμήνη με το Φαίδωνα στο Μυστρά με φόντο το ουράνιο τόξο και την κοιλάδα του Ευρώτα





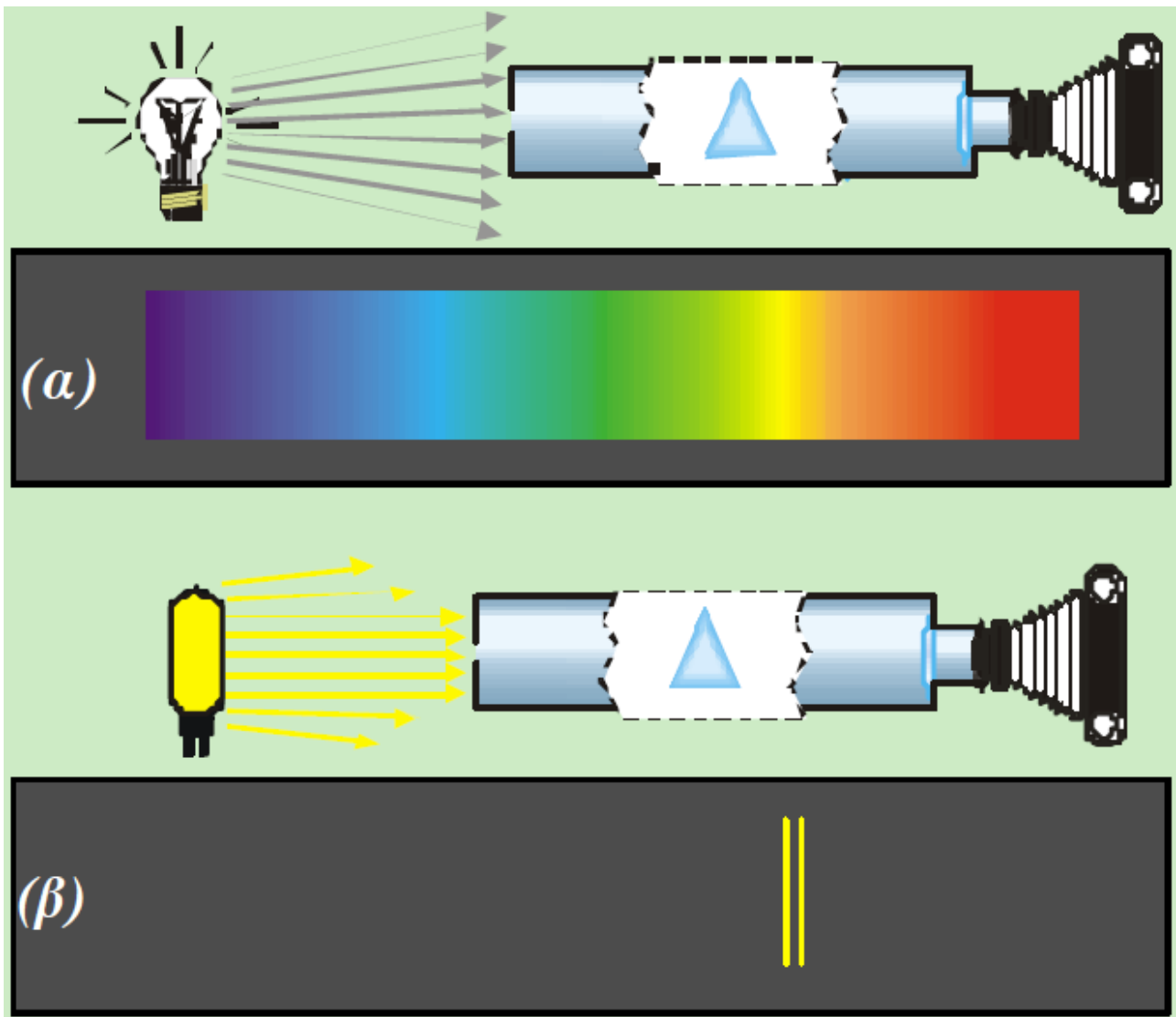


**3.4-11 Αρχή λειτουργίας του φασματοσκοπίου.** Με τη διόπτρα παρατηρούμε τα διάφορα χρώματα του φάσματος. Αν θέλουμε να αποτυπώσουμε το φάσμα, υπάρχουν ειδικές φωτογραφικές μηχανές που προσαρμόζονται στο προσοφθάλμιο σύστημα της διόπτρας.

### Το φασματοσκόπιο

Το φασματοσκόπιο (ή φασματογράφος) πρίσματος είναι ένα όργανο με το οποίο γίνεται η ανάλυση μίας δέσμης φωτός και η μελέτη του φάσματός της. Αποτελείται από τρία βασικά μέρη, τον κατευθυντήρα, το πρίσμα και τη διόπτρα. Το φως μίας πηγής εισέρχεται στον κατευθυντήρα, εξέρχεται από αυτόν, έτσι ώστε οι ακτίνες να είναι μεταξύ τους παράλληλες, προσπίπτει στο πρίσμα και αναλύεται στο φάσμα του. Οι εξερχόμενες ακτίνες παρατηρούνται από τη διόπτρα. Περιστρέφοντας το πρίσμα ή τη διόπτρα μπορούμε να παρατηρήσουμε τα διάφορα μήκη κύματος.

Αν στη διόπτρα προσαρμόσουμε το φακό μιας φωτογραφικής μηχανής, το φάσμα αποτυπώνεται στο φιλμ (φασματογράφος) και έτσι μπορούμε να μελετάμε τα μήκη κύματος του φωτός που εκπέμπει μία πηγή, λόγω χάρη το πυρακτωμένο νήμα ενός λαμπτήρα φωτισμού (λαμπτήρας πυρακτώσεως), ή μία λυχνία ατμών νατρίου.



3.4-12 Φάσματα εκπομπής που αποτυπώνονται στο φιλμ του φασματογράφου: (α) λαμπτήρα πυρακτώσεως, (β) λαμπτήρα νατρίου.

### Φάσματα εκπομπής

Το φάσμα της ακτινοβολίας που εκπέμπει μία φωτεινή πηγή ονομάζεται **φάσμα εκπομπής** της πηγής αυτής. Τα φάσματα εκπομπής των διάφορων πηγών διακρίνονται σε **συνεχή** και **γραμμικά**.

(α) **Συνεχή φάσματα εκπομπής.** Συνεχή φάσματα παίρνουμε, όταν εξετάζουμε με το φασματογράφο το φως που εκπέμπουν στερεά και υγρά σώματα τα οποία βρίσκονται σε μεγάλη θερμοκρασία (διάπυρα σώματα). Αν η πηγή του φωτός είναι, για παράδειγμα, ο λαμπτήρας πυρακτώσεως, τότε το φάσμα είναι μία συνεχής ταινία χρωμάτων, ακριβώς όπως την

περιγράψαμε προηγουμένως. Επίσης συνεχές φάσμα εκπέμπουν ο λιωμένος σίδηρος, ο λιωμένος χαλκός.

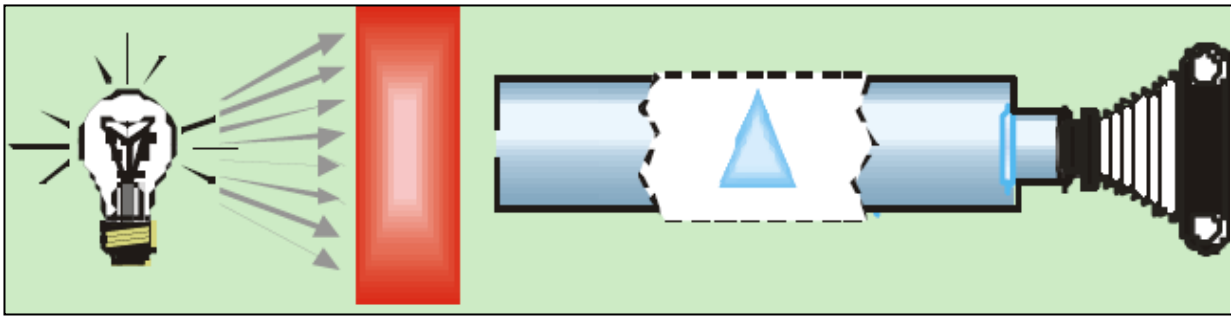
Επειδή τα συνεχή φάσματα, που εκπέμπονται από διάφορα διάπυρα σώματα, δε διαφέρουν μεταξύ τους, η μελέτη τέτοιων φασμάτων δεν μπορεί να μας δώσει πληροφορίες για τη φύση του σώματος, αν δηλαδή το σώμα αποτελείται από κάποιο συγκεκριμένο υλικό, όπως π.χ. σίδηρο, χαλκό κτλ. Η μοναδική πληροφορία που παίρνουμε είναι για τη θερμοκρασία του υλικού.

**(β) Γραμμικά φάσματα εκπομπής.** Αν εξετάσουμε με το φασματοσκόπιο το φως που εκπέμπουν θερμά αέρια ή ατμοί, τότε διαπιστώνουμε ότι το φάσμα τους, που αποτυπώνεται στο φιλμ, αποτελείται από διακριτές χρωματιστές γραμμές, χαρακτηριστικές για το είδος των αερίων ή των ατμών. Κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο μήκος κύματος ή συχνότητα. Αν κάνουμε, λόγου χάρη, φασματοσκοπική ανάλυση του φωτός που εκπέμπει η λυχνία ατμών νατρίου, θα παρατηρήσουμε ότι το φάσμα του αποτελείται από δύο κίτρινες γραμμές πολύ κοντά μεταξύ τους (σχήμα 1-12).

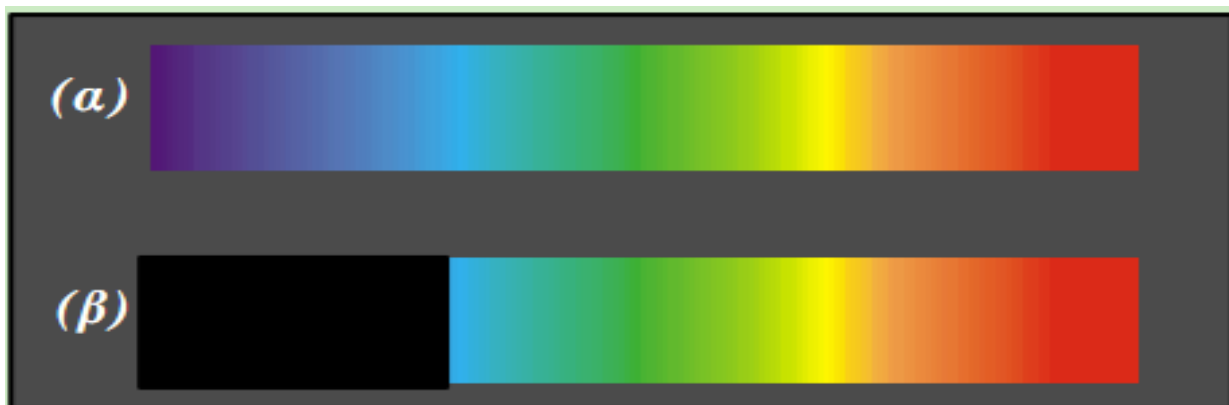
Στις αρχές του 19ου αιώνα είχε ανακαλυφθεί ότι κάθε στοιχείο παρουσιάζει ένα συγκεκριμένο σύνολο μηκών κύματος στο γραμμικό του φάσμα. Με την πάροδο του χρόνου η αναγνώριση στοιχείων από τα φάσματά τους εξελίχθηκε σε μια χρήσιμη τεχνική ανάλυσης. Το χαρακτηριστικό φάσμα ενός ατόμου φαινόταν να σχετίζεται με την εσωτερική του δομή, αλλά οι προσπάθειες να εξηγηθεί αυτό με την κλασική μηχανική και την ηλεκτροδυναμική δεν ήταν επιτυχείς. Τη λύση την έδωσε η εισαγωγή της κβαντομηχανικής στο παιχνίδι της έρευνας, η οποία οδήγησε σε δραστικές αλλαγές των απόψεων για τη φύση της ακτινοβολίας και την αλληλεπίδρασή της με την ύλη.

## Φάσματα απορρόφησης

Αν μεταξύ μίας φωτεινής πηγής που εκπέμπει λευκό φως και του κατευθυντήρα ενός φασματογράφου παρεμβάλουμε ένα υλικό μέσο, λόγω χάρη ένα δοχείο που να περιέχει έγχρωμο υγρό ή μια έγχρωμη γυάλινη πλάκα (σχήμα 1-13), θα διαπιστώσουμε ότι ορισμένες περιοχές του συνεχούς φάσματος λείπουν και στη θέση τους εμφανίζονται σκοτεινές περιοχές. Τα φάσματα αυτά τα ονομάζουμε **φάσματα απορρόφησης**, γιατί οι σκοτεινές περιοχές οφείλονται στο ότι οι ακτίνες ορισμένων χρωμάτων έχουν απορροφηθεί κατά τη διέλευσή τους από το υλικό μέσο. Τα φάσματα απορρόφησης τα διακρίνουμε σε **συνεχή** και **γραμμικά**.

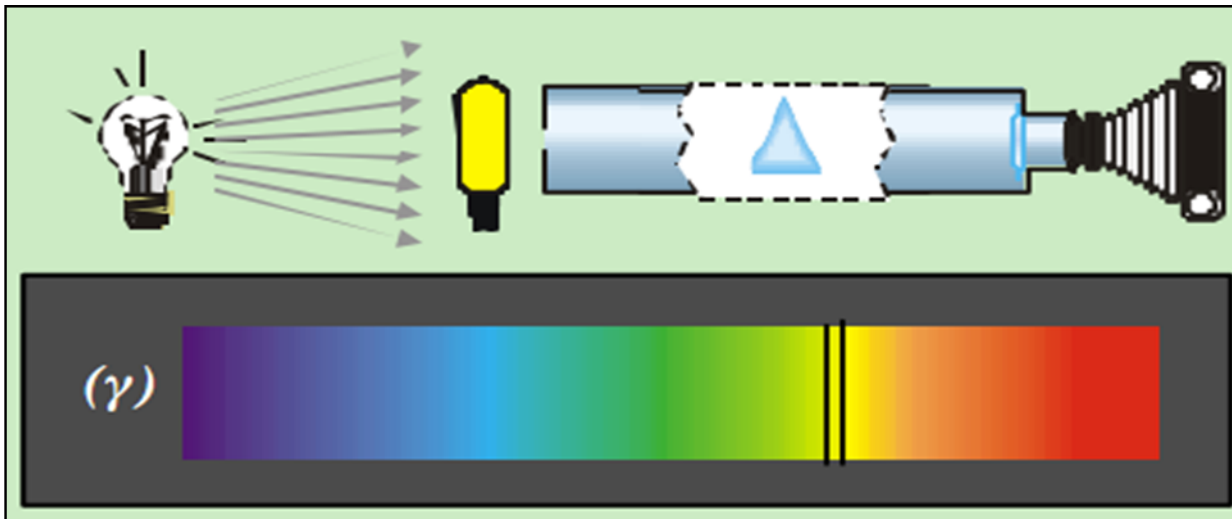


3.4-13 Τυπική διάταξη για την αποτύπωση του φάσματος απορρόφησης. Το κόκκινο γυαλί επιτρέπει τη διέλευση ακτινών με μήκη κύματος κοντά στην περιοχή του ερυθρού.



(α) Συνεχές φάσμα εκπομπής λευκού φωτός,  
(β) Συνεχές φάσμα απορρόφησης κόκκινου γυαλιού.





(γ) Γραμμικό φάσμα απορρόφησης ατμών Na.

(α) Συνεχή φάσματα απορρόφησης δίνουν τα έγχρωμα διαφανή στερεά και υγρά. Αν το υλικό που φωτίζουμε είναι γυάλινη κόκκινη πλάκα, τότε παίρνοντας το φάσμα θα παρατηρήσουμε ότι έχουν απορροφηθεί ορισμένες περιοχές του συνεχούς φάσματος εκπομπής. Συγκεκριμένα, από την κόκκινη πλάκα διέρχονται μόνο οι ακτίνες που βρίσκονται στην περιοχή του ερυθρού (σχήμα 1-13β).

(β) Γραμμικά φάσματα απορρόφησης δίνουν τα αέρια ή οι ατμοί. Αποτελούνται από ένα συνεχές φάσμα στο οποίο υπάρχουν σκοτεινές γραμμές. Έτσι, αν μεταξύ μίας φωτεινής πηγής που εκπέμπει λευκό φως και του κατευθυντήρα ενός φασματογράφου παρεμβάλουμε ένα διαφανές δοχείο με ατμούς νατρίου (σχήμα 1- 13γ), τότε στο συνεχές φάσμα του λευκού φωτός του λαμπτήρα θα παρατηρήσουμε σκοτεινές γραμμές, στις θέσεις ακριβώς εκείνες που θα εμφανίζονταν οι κίτρινες γραμμές του φάσματος εκπομπής των ατμών του νατρίου. Δηλαδή οι ατμοί του νατρίου έχουν απορροφήσει τις κίτρινες ακτινοβολίες που εκπέμπουν, όταν ακτινοβολούν.

## Υπεριώδης και υπέρυθρη ακτινοβολία

### Υπεριώδης ακτινοβολία

Το συνεχές φάσμα που παίρνουμε, όταν αναλύουμε με το φασματοσκόπιο το λευκό φως, τελειώνει στο ένα άκρο με ιώδες φως, ενώ στο άλλο με ερυθρό. Όπως φαίνεται από το σχήμα 1-14, το ορατό φως, δηλαδή τα μήκη κύματος που αντιλαμβάνεται το μάτι μας, έχει όρια και τα χρώματά του έχουν μήκη κύματος που κυμαίνονται μεταξύ 400nm του ιώδους και 700nm του ερυθρού. Αυτό όμως δε σημαίνει ότι το φάσμα του λευκού φωτός, που εκπέμπει η φωτεινή πηγή, περιορίζεται σε αυτά τα όρια.



#### 3.4-14 Φάσμα υπεριώδους - γκρίζα περιοχή στο φιλμ πέρα από το ιώδες.

Αν παρατηρήσουμε με ειδικό φασματογράφο τη φωτογραφική πλάκα στην οποία αποτυπώνεται το φάσμα, θα διαπιστώσουμε ότι πέρα από το όριο της ιώδους περιοχής η πλάκα έχει αμαυρωθεί. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, εκτός από την ακτινοβολία της ορατής περιοχής του φάσματος, υπάρχει και ακτινοβολία αόρατη, η οποία βρίσκεται πέρα από την ιώδη περιοχή. Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται **υπεριώδης ακτινοβολία**.

Η υπεριώδης ακτινοβολία αποτελείται από ακτινοβολίες που έχουν μήκη κύματος μικρότερα των 400nm και μεγαλύτερα του 1nm περίπου.



(α)



(β)

**3.4-15 Δύο φωτογραφίες του ίδιου αγαλματιδίου τραβηγμένες η (α) στο ορατό φως και η (β) στο υπεριώδες.**

Αν και η υπεριώδης ακτινοβολία δεν είναι ορατή με γυμνό μάτι, μερικές από τις ιδιότητες της μας πληροφορούν για την ύπαρξή της:

1. Προκαλεί αμαύρωση των φωτογραφικών πλακών.
2. Προκαλεί το φθορισμό σε διάφορα σώματα, όταν δηλαδή προσπίπτει σε ορισμένα σώματα, τότε αυτά εκπέμπουν χαρακτηριστικές ορατές ακτινοβολίες.
3. Συμμετέχει στη μετατροπή του οξυγόνου της ατμόσφαιρας σε όζον.
4. Όταν απορροφάται από υλικά σώματα (όπως άλλωστε και οι ακτίνες οποιουδήποτε χρώματος), προκαλεί τη θέρμανσή τους.
5. Υπεριώδης ακτινοβολία με πολύ μικρό μήκος κύματος προκαλεί βλάβες στα κύτταρα του δέρματος, οι οποίες μπορεί να είναι τέτοιες, ώστε να οδηγήσουν και στην εμφάνιση καρκίνου. Κατά τη διάρκεια της ηλιοθεραπείας το μαύρισμα του δέρματος οφείλεται στη μελανίνη που παράγει ο οργανισμός, για να προστατευθεί από την υπεριώδη ακτινοβολία.

6. Χρησιμοποιείται στην Ιατρική για πλήρη αποστείρωση διάφορων εργαλείων.

### Υπέρυθρη ακτινοβολία

Αναλύοντας το λευκό φως ενός λαμπτήρα πυρακτώσεως πάνω σε πέτασμα παίρνουμε το φάσμα του. Αν τοποθετήσουμε ένα ευαίσθητο θερμόμετρο πάνω στο πέτασμα και το μετακινήσουμε από το ιώδες προς το ερυθρό, θα παρατηρήσουμε τη θερμοκρασία του να αυξάνεται. Πιο πέρα από το ερυθρό η ένδειξη είναι ακόμη μεγαλύτερη.

Μετά την ερυθρή περιοχή του φάσματος υπάρχει αόρατη ακτινοβολία, που προκαλεί έντονη αύξηση της θερμοκρασίας των στερεών και υγρών σωμάτων. Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται υπέρυθρη ακτινοβολία.



3.4-16 Η φωτογραφία έχει ληφθεί με φιλμ ευαίσθητο στο υπέρυθρο φως. Η αντίστοιχη του ορατού φωτός δεν ήταν δυνατό να ληφθεί, γιατί τη στιγμή της λήψης επικρατούσε σκοτάδι.

Επειδή η υπέρυθρη ακτινοβολία είναι αόρατη, για την ανίχνευσή της υπάρχουν ειδικά όργανα, οι φωρατές υπερύθρου. Η αρχή λειτουργίας των φωρατών βασίζεται στην απορρόφηση ενέργειας των υπέρυθρων ακτινοβολιών και στη συνέχεια στη μετατροπή της σε άλλες μορφές. Οι υπέρυθρες ακτινοβολίες έχουν μήκη



κύματος που κυμαίνονται μεταξύ 700nm και  $10^6$ nm. Μερικές από τις ιδιότητες των υπέρυθρων είναι οι εξής:

1. Απορροφώνται επιλεκτικά από διάφορα σώματα και προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας τους.
2. Διέρχονται μέσα από την ομίχλη και τα σύννεφα (δεν απορροφώνται από αέρια, σχήμα 1-17).
3. Δεν έχουν χημική δράση και δεν προκαλούν φωσφορισμό.

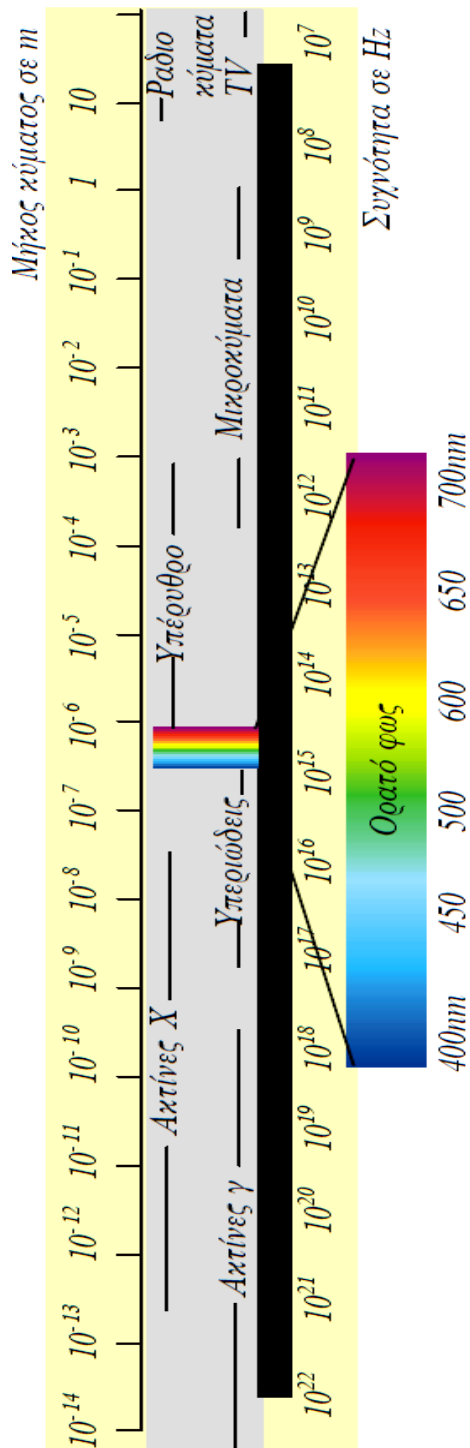
**Εφαρμογές:** Η χρήση των υπέρυθρων βασίζεται στην εκλεκτικότητά τους να απορροφώνται από την ύλη. Στην Ιατρική, για παράδειγμα, δέσμη υπέρυθρης ακτινοβολίας μεταδίδει θερμότητα σε ορισμένη περιοχή του σώματος. Επίσης με ειδικές φωτογραφικές μηχανές πετυχαίνεται φωτογράφιση ακόμη και όταν υπάρχει συννεφιά ή ομίχλη (σχήμα 1-17).



(α)

(β)

3.4-17 Δύο φωτογραφίες του ίδιου τοπίου, την ίδια στιγμή. Η (α) έχει ληφθεί με φιλμ του εμπορίου, ενώ η (β) με φιλμ ευαίσθητο στην υπέρυθρη ακτινοβολία και με χρήση φίλτρου που επιτρέπει μόνο τη διέλευση υπέρυθρου φωτός.



**Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.**  
 Τα όρια μεταξύ των ζωνών  
 είναι κάπως αυθαίρετα.

### 3.5 ΠΟΛΩΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

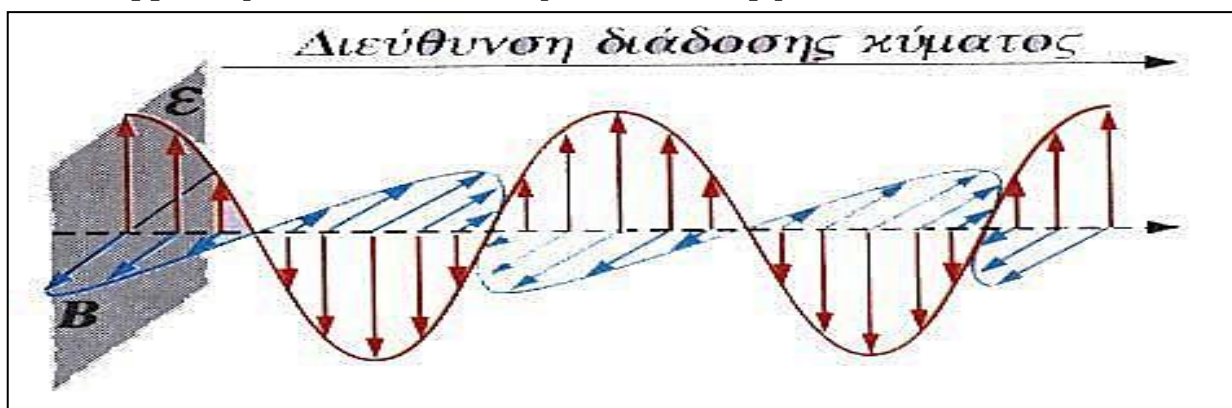
#### Φυσικό φως και γραμμικά πολωμένο φως

Όπως είδαμε σε προηγούμενη ενότητα, το φως (όπως άλλωστε ολόκληρη η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία ξεκινούν από μία φωτεινή πηγή και κινούνται ευθύγραμμα προς όλες τις κατευθύνσεις.

Οι συνήθεις φωτεινές πηγές (π.χ. λαμπτήρας πυρακτώσεως, Ήλιος κτλ.) αποτελούνται από μεγάλο αριθμό ατόμων ή μορίων. Τα φωτεινά κύματα παράγονται από όλα τα άτομα και μόρια του υλικού που εκπέμπει το φως. Κάθε άτομο ή μόριο εκπέμπει ένα μεμονωμένο κύμα.

Σε κάθε τέτοιο κύμα το ηλεκτρικό πεδίο έχει διεύθυνση ταλάντωσης κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Η διεύθυνση ταλάντωσης και η διεύθυνση διάδοσης καθορίζουν ένα συγκεκριμένο επίπεδο ταλάντωσης για κάθε μεμονωμένο κύμα (σχήμα 1-18). Καταλαβαίνουμε λοιπόν ότι:

**Το φυσικό φως είναι σύνθεση πολλών κυμάτων με διάφορα επίπεδα ταλάντωσης των ηλεκτρικών και μαγνητικών τους πεδίων και τυχαίες διευθύνσεις διάδοσης.**



**3.5-18 Στιγμιότυπο ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Όπως γνωρίζουμε, το ηλεκτρομαγνητικό κύμα αποτελείται από δύο εγκάρσια κύματα κάθετα μεταξύ τους, ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό.**

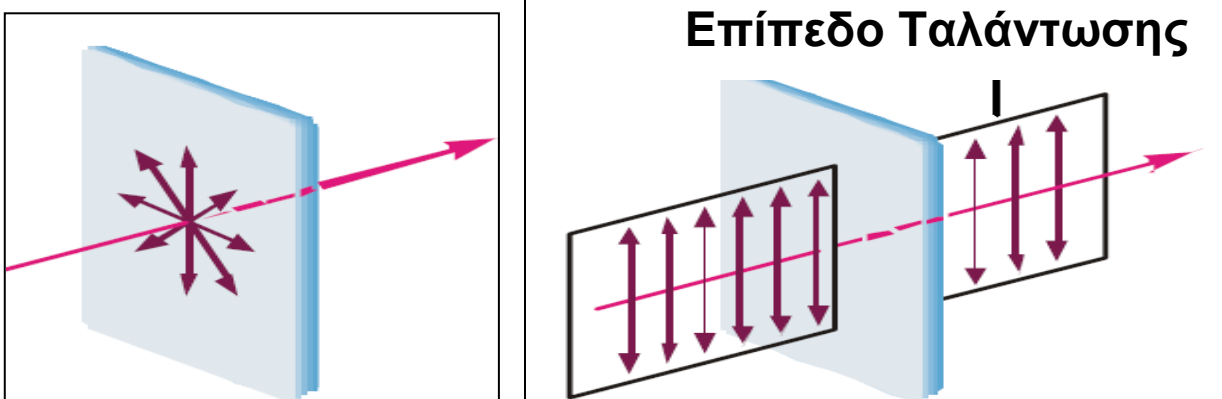
Για να κατανοήσουμε το φαινόμενο της πόλωσης, αρκεί να περιοριστούμε στη μελέτη μόνο του ηλεκτρικού κύματος. Αν το επίπεδο ταλάντωσης του ηλεκτρικού πεδίου ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι σταθερό με το χρόνο, τότε το κύμα ονομάζεται γραμμικά πολωμένο. Άρα:



Το φως είναι γραμμικά πολωμένο, όταν το επίπεδο ταλάντωσης του ηλεκτρικού του πεδίου έχει έναν καθορισμένο προσανατολισμό στο χώρο και μία καθορισμένη διεύθυνση διάδοσης.

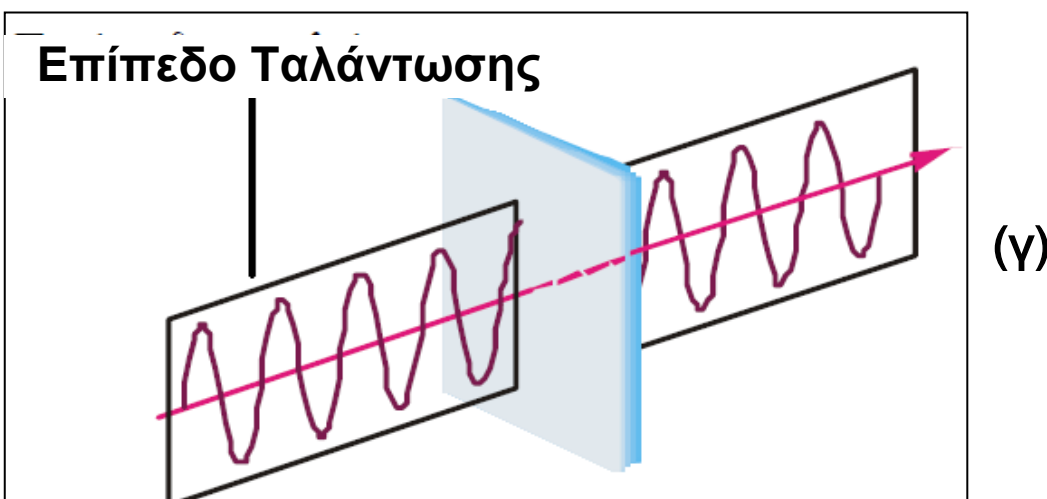
Το φυσικό φως που δεχόμαστε απευθείας από μια φωτεινή πηγή, επειδή προέρχεται από πολλά άτομα ή μόρια, έχει πολλά επίπεδα ταλάντωσης και συνεπώς δεν είναι πολωμένο.

Το φυσικό φως απεικονίζεται παραστατικά στο σχήμα 1-19α, ενώ το γραμμικά πολωμένο φως στο σχήμα 1-19 β, γ.



(α)

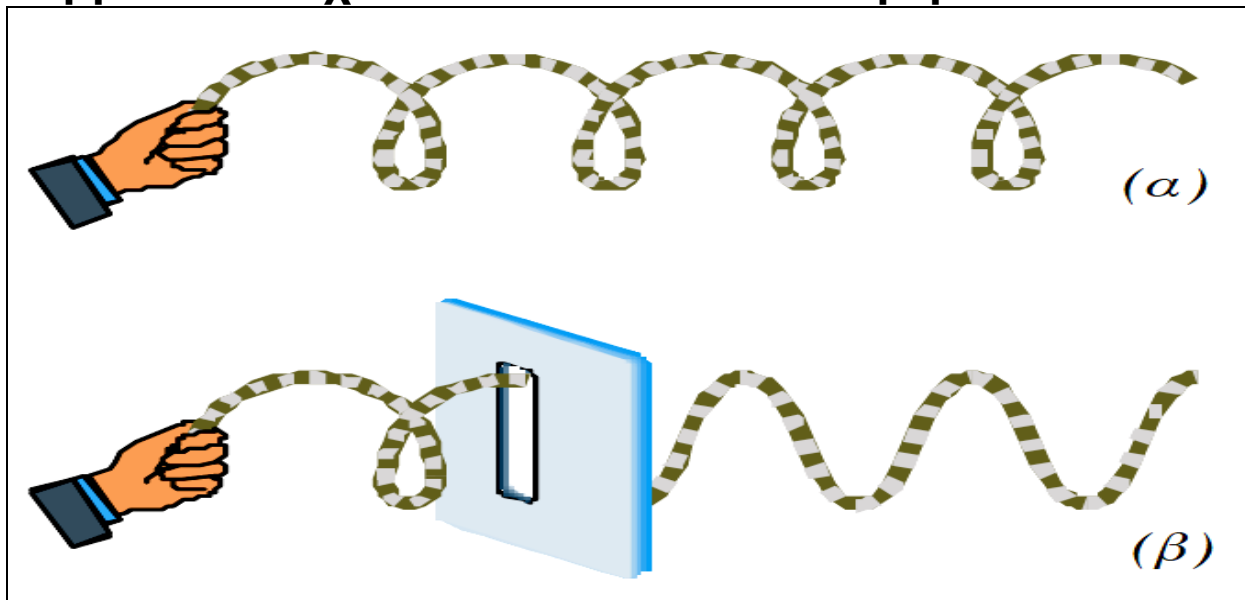
(β)



3.5-19 (α) Το φυσικό φως και (β), (γ) το γραμμικά πολωμένο φως

## Πολωτικό φίλτρο - Πολωτής

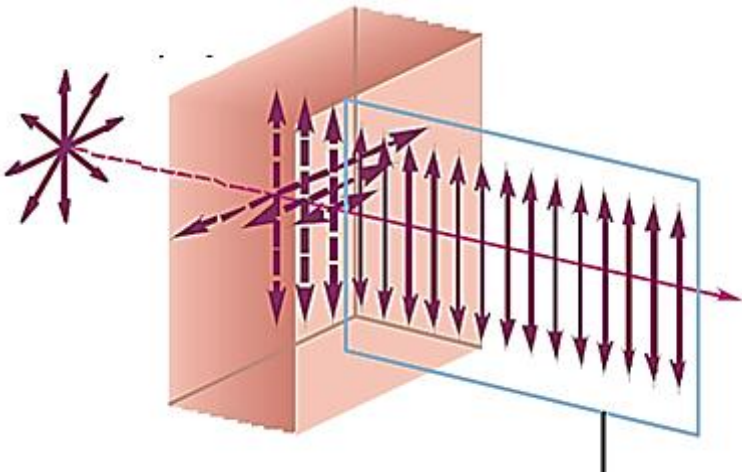
Το φυσικό φως είναι δυνατόν, περνώντας από κατάλληλα φίλτρα (πολωτές) ή παθαίνοντας κατάλληλη ανάκλαση, να μετατραπεί σε γραμμικά πολωμένο φως. Για να κατανοήσουμε τι είναι ακριβώς το πολωτικό φίλτρο, ας παρακολουθήσουμε τη διαδικασία πόλωσης ενός μηχανικού κύματος. Θυμίζουμε ότι ένα από τα μηχανικά κύματα είναι και αυτό που παράγεται, όταν αναγκάζουμε την άκρη ενός σχοινιού να πάλλεται. Δημιουργούμε έτσι ένα εγκάρσιο κύμα (σχήμα 1-20α), το οποίο διαδίδεται ακανόνιστα. Δηλαδή κάθε στοιχειώδες κομμάτι του σχοινιού πάλλεται σε διαφορετικά επίπεδα.



**3.5-20 Πίσω από τη σχισμή το κύμα είναι πολωμένο.**

Αν παρεμβάλουμε ένα πέτασμα με κατακόρυφη σχισμή στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (σχήμα 3.5-20α), έτσι ώστε το σχοινί να διέρχεται από αυτό, τότε τα στοιχειώδη κομμάτια του σχοινιού που βρίσκονται μετά το πέτασμα πάλλονται σε ένα και μόνο επίπεδο, το χαρακτηριστικό επίπεδο που ορίζει η σχισμή με τη διεύθυνση διάδοσης. Η σχισμή στην παραπάνω διαδικασία αποτέλεσε το πολωτικό φίλτρο. Το φαινόμενο ονομάζεται πόλωση του μηχανικού κύματος.

## Φυσικό φως



Επίπεδο Πόλωσης

**3.5-21 Φυσικό φως διέρχεται από πολωτικό φίλτρο. Οι οριζόντιες ταλαντώσεις έχουν απορροφηθεί ολοσχερώς, ενώ οι κατακόρυφες μερικώς.**

Για την πόλωση του φυσικού φωτός χρησιμοποιούμε ειδικά πολωτικά φίλτρα. Όταν το φως προσπέσει σε πολωτικό φίλτρο, τότε το φως που εξέρχεται από αυτό είναι πολωμένο. Το επίπεδο ταλάντωσης είναι αυτό που καθορίζεται από το υλικό του φίλτρου. Τα κύματα με επίπεδο ταλάντωσης κάθετο προς το επίπεδο που καθορίζει το φίλτρο ανακόπτονται κατά μεγάλο ποσοστό (σχήμα 3.5-21). Η συσκευή που περιέχει το πολωτικό φίλτρο ονομάζεται πολωτής. Είναι μια διάταξη κατασκευασμένη έτσι, ώστε να μπορούμε να στρέψουμε το πολωτικό φίλτρο, που έχει μορφή πλακιδίου, γύρω από άξονα κάθετο προς το επίπεδο του (σχήμα 3.5-22).

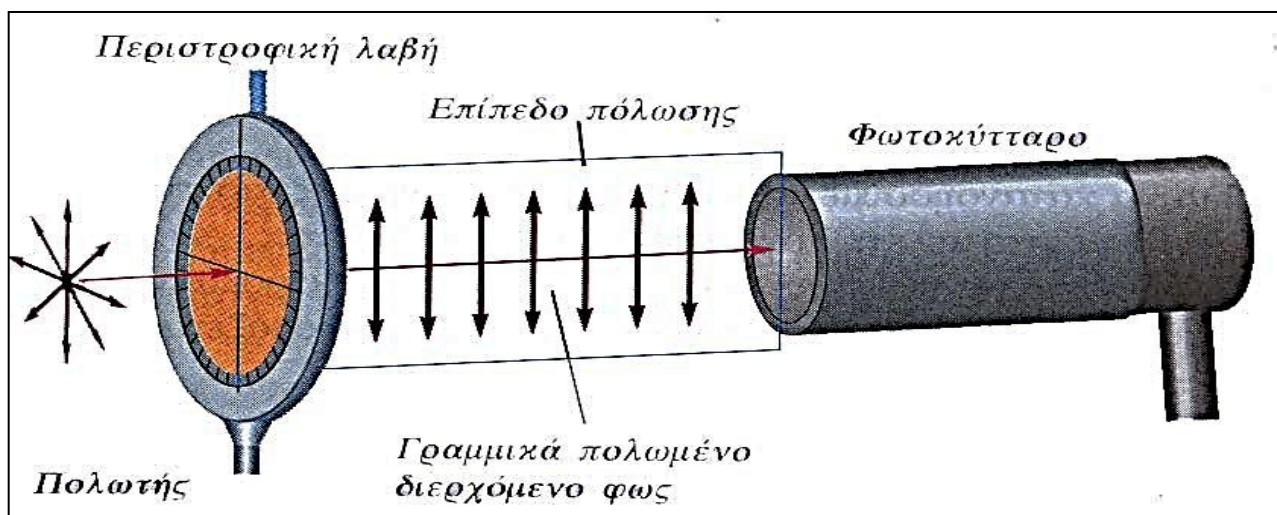
Ένας τέλειος πολωτής επιτρέπει τη διέλευση κατά 100% του προσπίπτοντος φωτός, όταν αυτό είναι πολωμένο στο επίπεδο πόλωσης του φίλτρου, και ανακόπτει τελείως τα κύματα φωτός που είναι πολωμένα σε διεύθυνση κάθετη προς το επίπεδο αυτό.

Το επίπεδο πόλωσης του πολωτή είναι χαρακτηριστικό του πλακιδίου και η διεύθυνσή του καθορίζεται κάθε φορά από την περιστροφική λαβή,

που βρίσκεται στην κορυφή του. Άρα, περιστρέφοντας τη λαβή, καθορίζουμε τη θέση του χαρακτηριστικού επιπέδου πόλωσης του πολωτή.

Έτσι, στο σχήμα 3.5-22, φυσικό φως προερχόμενο από λαμπτήρα πυρακτώσεως προσπίπτει σε έναν πολωτή. Το επίπεδο πόλωσης και η περιστροφική λαβή είναι σημειωμένα με μπλε χρώμα. Ο πολωτής επιτρέπει τη διέλευση μόνο των κυμάτων φωτός που έχουν ένταση ηλεκτρικού πεδίου παράλληλη προς το επίπεδο πόλωσης του πλακιδίου. Έτσι το φως που βγαίνει από τον πολωτή είναι γραμμικά πολωμένο παράλληλα προς το επίπεδο πόλωσης.

Αν τώρα επιχειρήσουμε να μετρήσουμε την ένταση του εξερχόμενου φωτός με ένα φωτοκύτταρο, θα παρατηρήσουμε ότι, για οποιαδήποτε γωνία προσανατολισμού του επιπέδου πόλωσης, η ένταση του φωτός έχει την ίδια τιμή, η οποία μάλιστα είναι ίση με το μισό της έντασης του προσπίπτοντος φωτός.



3.5-22 Για οποιαδήποτε γωνία προσανατολισμού του επιπέδου πόλωσης το φωτοκύτταρο μετράει την ίδια ένταση φωτός και τη βρίσκει ίση ακριβώς με το μισό της έντασης τον προσπίπτοντος στο πλακίδιο του πολωτή.

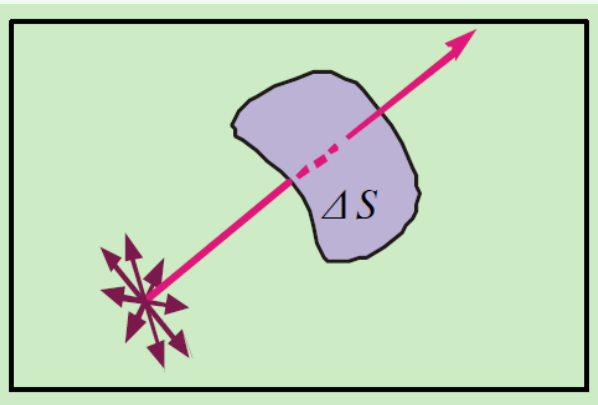
**3.5-23** Με τον όρο «ένταση του προσπίπτοντος φωτός» εννοούμε την ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας. Ας το δούμε αναλυτικά: Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα έχουν ενέργεια, όπως για παράδειγμα η ακτινοβολία του Ήλιου και η ακτινοβολία των φούρνων μικροκυμάτων. Έστω λοιπόν ότι έχουμε μια στοιχειώδη επιφάνεια  $\Delta S$ , κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, που δέχεται συνεχώς ενέργεια  $\Delta W$  σε χρόνο  $\Delta t$ .

Το πηλίκο  $\Delta W/\Delta t$  ονομάζεται ισχύς.

Η ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας ορίζεται ως ένταση του κύματος. Δηλαδή:

$$I = \frac{\Delta W}{\Delta t \Delta S} = \frac{P}{A}$$

Η μονάδα μέτρησης της έντασης στο S.I. είναι το  $1 \text{ W/m}^2$ .

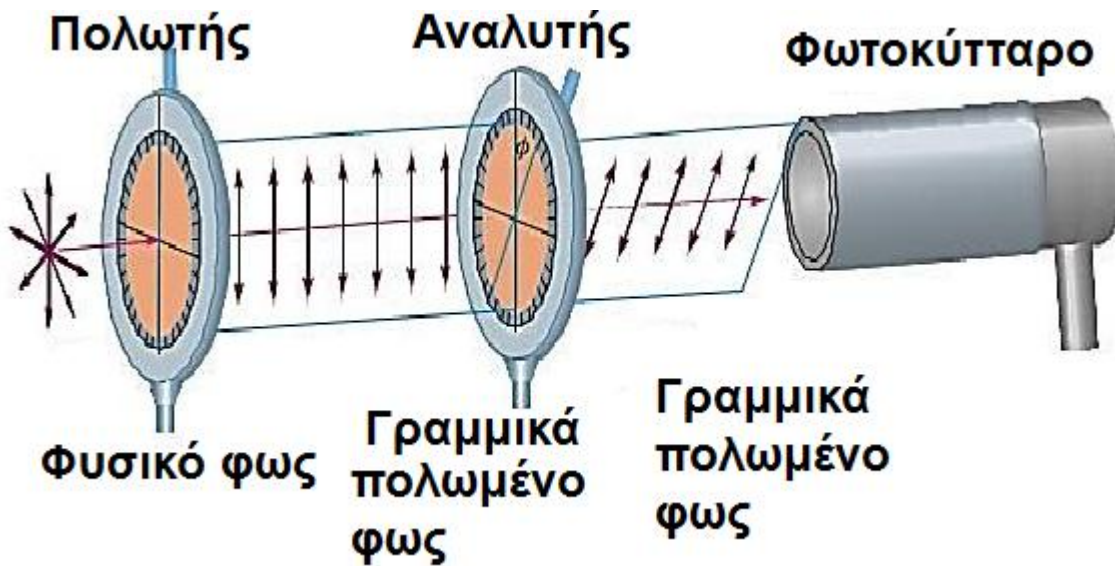


Αποδεικνύεται ότι η ένταση του κύματος είναι ανάλογη προς το τετράγωνο του πλάτους  $E_0$  του ηλεκτρικού πεδίου του κύματος.

### Συνδυασμός δύο πολωτικών φίλτρων – Αναλυτής

Ας υποθέσουμε όχι μεταξύ του φωτοκύτταρου και του πρώτου πολωτή τοποθετούμε ένα δεύτερο, όμοιο κατασκευαστικά. Το επίπεδο πόλωσης του πρώτου πολωτή έστω ότι παραμένει κατακόρυφο, ενώ του δεύτερου, τον οποίο ονομάζουμε αναλύτη, σχηματίζει γωνία  $\phi$  με την κατακόρυφο (σχήμα 3.5-24)





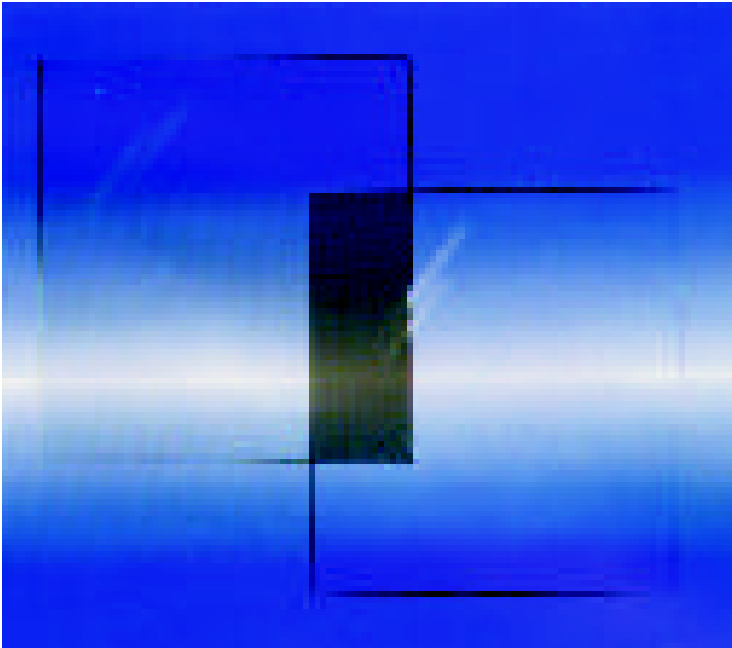
**3.5-24 Ο τέλειος αναλύτης επιτρέπει τη διέλευση μόνο της συνιστώσας του ηλεκτρικού πεδίου που είναι παράλληλη προς το χαρακτηριστικό επίπεδο πόλωσης του.**

Αυτό σημαίνει ότι η γωνία μεταξύ των δύο επιπέδων πόλωσης είναι  $\varphi$ . Το τι θα συμβεί κατά τη διέλευση του πολωμένου φωτός από τον αναλύτη εξαρτάται από τη γωνία  $\varphi$ .

Όταν τα χαρακτηριστικά επίπεδα του πολωτή και του αναλύτη συμπίπτουν ( $\varphi = 0$ ), το πολωμένο φως θα διέλθει από τον αναλύτη χωρίς να υποστεί μεταβολή.

Όταν τα χαρακτηριστικά επίπεδα του πολωτή και του αναλύτη είναι κάθετα ( $\varphi = 90^\circ$ ), το πολωμένο φως θα ανακοπεί εντελώς από τον αναλύτη. Το φωτοκύτταρο τότε δεν ανιχνεύει φως.

Τα υλικά που έχουν την ιδιότητα να αφήνουν να τα διαπερνά μόνο το φως του οποίου το ηλεκτρικό πεδίο ταλαντώνεται σε συγκεκριμένη διεύθυνση λέγονται **διχροϊκά**. Το 1938 ο E.H. Land ανακάλυψε ένα υλικό που ονόμασε **rolaroid**. Το rolaroid πολώνει το φως, γιατί τα προσανατολισμένα μόριά του έχουν την ιδιότητα να απορροφούν επιλεκτικά τη διερχόμενη ακτινοβολία από μέσα του.



3.5-25 Ένας πολωτής και ένας αναλυτής με επίπεδα πόλωσης κάθετα μεταξύ τους ανακόπτουν το φως (σκοτεινή περιοχή).

Για οποιαδήποτε άλλη γωνία  $\varphi$  μεταξύ των χαρακτηριστικών επιπέδων του πολωτή και του αναλύτη το πολωμένο φως θα διέρχεται εν μέρει.

Παρατηρούμε ότι η διαφορά μεταξύ του πολωτή και του αναλύτη εντοπίζεται μόνο στους σκοπούς τους οποίους αυτοί εξυπηρετούν, δηλαδή σε ένα πείραμα ο πολωτής μπορεί να παίξει το ρόλο του αναλύτη και αντίστροφα.

Χρησιμοποιώντας τον αναλύτη μπορούμε να διαπιστώσουμε αν μία δέσμη φωτός είναι πολωμένη ή όχι.

Αφήνουμε τη δέσμη να πέσει στον αναλύτη κάθετα προς αυτόν. Με την περιστροφική λαβή καθορίζουμε διάφορες γωνίες στο επίπεδο πόλωσης του αναλύτη. Αν παρατηρήσουμε ότι δεν υπάρχει γωνία για την οποία ανακόπτεται το διερχόμενο φως, τότε αυτό είναι φυσικό. Αν όμως συμβαίνει το αντίθετο, δηλαδή υπάρχουν γωνίες για τις οποίες ανακόπτεται το διερχόμενο φως, τότε το φως είναι γραμμικά πολωμένο.

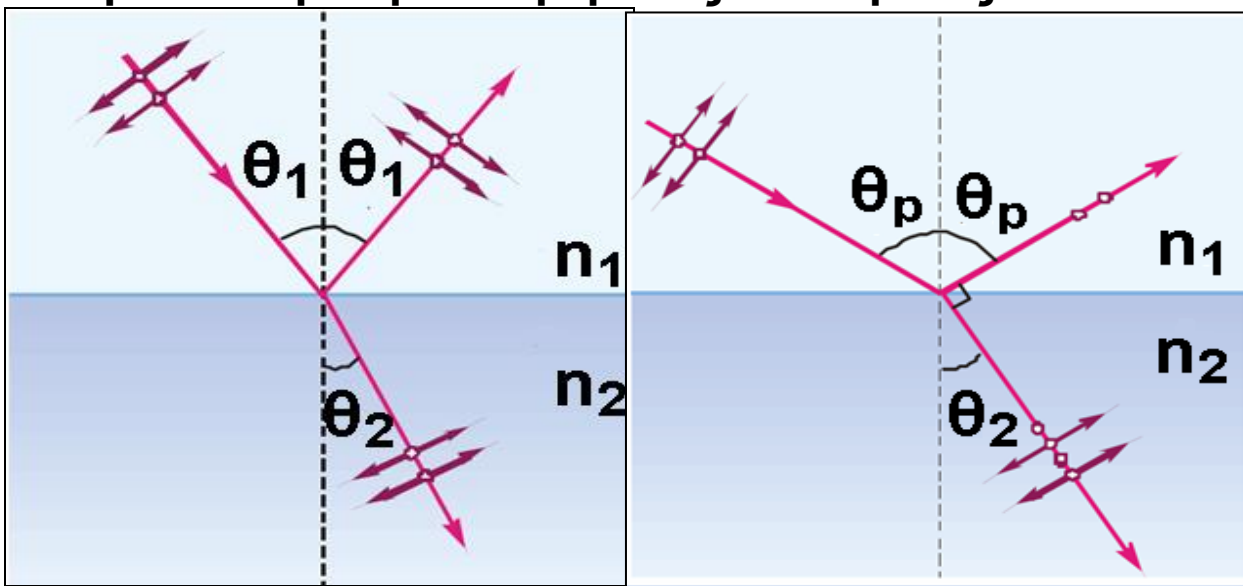


## Πόλωση από ανάκλαση - Φυσική πόλωση

Όταν μη πολωμένο φως προσπίπτει πάνω σε διαχωριστική επιφάνεια δύο οπτικών υλικών μέσων με δείκτες διάθλασης  $n_1$  και  $n_2$ , τότε εν μέρει ανακλάται και εν μέρει διαθλάται.

Αν εξετάσουμε με αναλύτη την ανακλώμενη δέσμη, θα παρατηρήσουμε ότι, όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι περίπου  $0^\circ$  ή περίπου  $90^\circ$ , το ανακλώμενο φως δεν είναι πολωμένο. Για ενδιάμεσες γωνίες πρόσπτωσης το ανακλώμενο φως είναι μερικώς πολωμένο, δηλαδή αποτελείται από γραμμικά πολωμένο φως και μη πολωμένο φως. Υπάρχει μία συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης, που ονομάζεται γωνία ολικής πόλωσης ( $\theta_p$ ), για την οποία το ανακλώμενο φως είναι πλήρως πολωμένο.

Ας προσπαθήσουμε να παραστήσουμε γραφικά το φαινόμενο χρησιμοποιώντας δύο συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου, μία παράλληλη προς την ανακλώσα επιφάνεια (με τελείες) και μία κάθετη προς την πρώτη και τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (με βέλη). Έτσι στο σχήμα 1-26α έχουμε μερική πόλωση του προσπίπτοντος φωτός, δηλαδή η ανακλώμενη δέσμη και η διαθλώμενη είναι μερικώς πολωμένες.



(α)

(β)

3.5-26 α) Όταν μη πολωμένο φως προσπίπτει σε διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών, η ανακλώμενη και η διαθλώμενη ακτίνα είναι μερικώς πολωμένες, (β) Όταν μη πολωμένο φως προσπίπτει σε ανακλώσα επιφάνεια υπό γωνία ίση με τη γωνία ολικής πόλωσης, η ανακλώμενη και η διαθλώμενη ακτίνα είναι κάθετες μεταξύ τους

Υποθέτουμε τώρα ότι μεταβάλλουμε τη γωνία πρόσπτωσης, ώσπου η ανακλώμενη και η διαθλώμενη δέσμη να σχηματίζουν γωνία  $90^\circ$ , δηλαδή να ισχύει  $\theta_2 + \theta_p = 90^\circ$ . Τότε η ανακλώμενη δέσμη είναι πλήρως πολωμένη, ενώ η διαθλώμενη είναι μερικώς πολωμένη (σχήμα 1-26β).

Η γωνία ολικής πόλωσης  $\theta_p$  συνδέεται με τους δείκτες διάθλασης  $n_1$  και  $n_2$  των δύο οπτικών υλικών. Η σύνδεση αυτή προκύπτει από το νόμο του Snell (Σνελ), σύμφωνα με τον οποίο ο λόγος  $n_2/n_1$ , των δεικτών διάθλασης είναι αντιστρόφως ανάλογος των ημίτονων των γωνιών πρόσπτωσης  $\theta_1$  και διάθλασης  $\theta_2$ , δηλαδή:

<b>Νόμος του Snell</b>	$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\eta\mu \theta_1}{\eta\mu \theta_2} \quad (3.6)$
------------------------	---

Εφαρμόζοντας λοιπόν την παραπάνω σχέση για  $\theta_1 = \theta_p$  και για  $\theta_2 = 90^\circ - \theta_p$  έχουμε:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\eta\mu \theta_p}{\eta\mu(90^\circ - \theta_p)}$$

Όμως από την τριγωνομετρία ισχύει:  $\eta\mu(90^\circ - \theta_p) = \sigma\upsilon\nu\theta_p$ . Άρα τελικά προκύπτει:

<b>Νόμος του Brewster</b>	$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\eta\mu \theta_p}{\sigma\upsilon\nu \theta_p} \quad \text{ή} \quad \frac{n_2}{n_1} = \epsilon\phi\theta_p \quad (3.7)$
---------------------------	---

Η τελευταία σχέση είναι γνωστή ως νόμος του Brewster (Μπρούστερ) και η γωνία ολικής πόλωσης ονομάζεται γωνία του Brewster.

**Άρα: Η γωνία ολικής πόλωσης του φωτός, για κάθε μέσο, είναι εκείνη η γωνία πρόσπτωσης για την οποία η ανακλώμενη ακτίνα και η διαθλώμενη είναι κάθετες μεταξύ τους.**

Αν τώρα το ένα οπτικό υλικό είναι το κενό ή ο ξηρός αέρας, οπότε  $n_1 = 1$ , τότε  $n_2 = n$  και η σχέση παίρνει τη μορφή:  $n = \varepsilon \varphi \theta_p$ .

### **Πόλωση και πολωτικά φίλτρα στην καθημερινή μας ζωή**

Η πόλωση από ανάκλαση είναι ένα σύνηθες φαινόμενο στη φύση. Το φως που ανακλάται από επιφάνειες λιμνών και θαλασσών, καθώς και από το χιόνι, είναι μερικώς πολωμένο. Όταν λοιπόν η ανάκλαση προέρχεται από μια τέτοια επιφάνεια, προκαλεί στα μάτια μας μια ανεπιθύμητη δυνατή «αντηλιά».

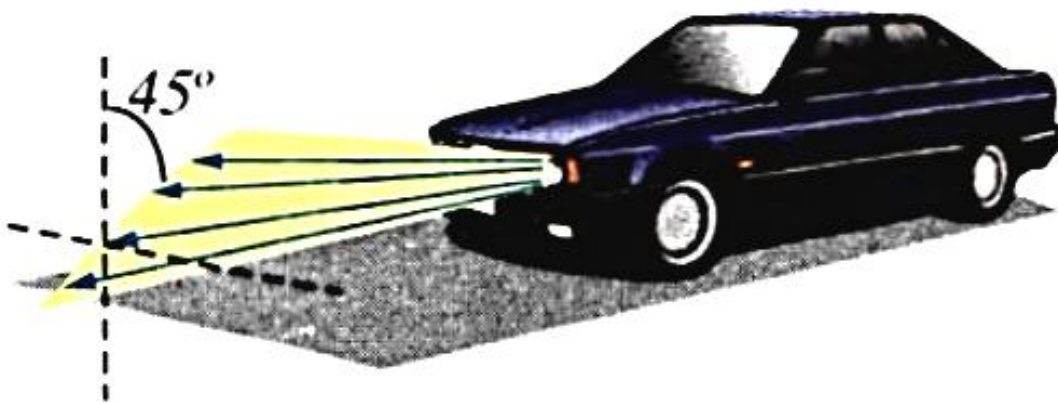
Επειδή οι ανακλώσες επιφάνειες που αναφέραμε είναι συνήθως οριζόντιες, το διάνυσμα του ανακλασμένου ηλεκτρικού πεδίου θα έχει μεγάλη οριζόντια συνιστώσα, δηλαδή το ανακλώμενο φως θα περιέχει περίσσεια πολωμένου φωτός στην οριζόντια διεύθυνση.

Τα γυαλιά ηλίου λοιπόν που διαθέτουν απορροφητικό φίλτρο polaroid έχουν τέτοια κατασκευή, ώστε το χαρακτηριστικό επίπεδο πόλωσής τους να είναι κατακόρυφο και να απορροφούν στο μέγιστο δυνατό την οριζόντια συνιστώσα του ανακλώμενου φωτός. Έτσι στα μάτια φτάνει ένα μικρό ποσοστό του πολωμένου φωτός.

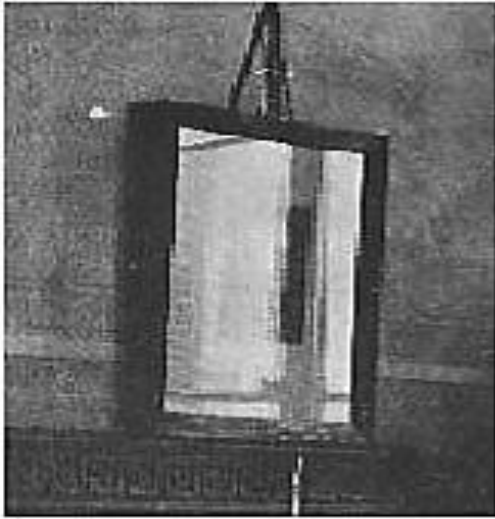
Για την πόλωση τον φυσικού φωτός χρησιμοποιούμε ειδικά φίλτρα, που είναι γνωστά με την εμπορική τους ονομασία ως polaroid (πολαρόιντ). Στην καθημερινότητα είναι γνωστά για τη χρήση τους στα γυαλιά ηλίου και στους φακούς φωτογραφικών μηχανών.

Ένα τέτοιο φίλτρο επιτρέπει τη διέλευση φωτεινών κυμάτων έντασης μέχρι και ποσοστό 80%, μόνο αυτών που είναι γραμμικά πολωμένα με το καθορισμένο από το υλικό επίπεδο πόλωσης, και απορροφά περίπου το 99% της έντασης των κυμάτων που είναι πολωμένα κάθετα προς το επίπεδο αυτό.

Μία άλλη συνηθισμένη χρήση των πολωτικών φίλτρων είναι στα κρύσταλλα που καλύπτουν τα φώτα των αυτοκινήτων και στα παρμπρίζ. Και στα κρύσταλλα των φώτων και στα παρμπρίζ υπάρχουν πολωτικά φίλτρα των οποίων το χαρακτηριστικό επίπεδο πόλωσης σχηματίζει γωνία  $45^\circ$  με το οριζόντιο επίπεδο και έχει τον ίδιο προσανατολισμό σε όλα τα αυτοκίνητα. Όταν δύο αυτοκίνητα διασταυρώνονται τη νύχτα, το παρμπρίζ του ενός λειτουργεί ως αναλυτής για το φως των φαναριών του άλλου αυτοκινήτου, που είναι πολωμένο. Έτσι μειώνεται η ένταση του φωτός που δέχεται ο οδηγός και αποφεύγεται αισθητά η ενόχληση.



Σημείωση: Η πόλωση του φωτός κατά την ανάκλαση παρουσιάζεται μόνο, όταν ταυτόχρονα γίνεται και διάθλαση του φωτός. Για να εμφανίζεται επομένως κατά την ανάκλαση το φαινόμενο της πόλωσης, δεν πρέπει η ανάκλαση να γίνεται σε μεταλλικές επιφάνειες και σε επιφάνειες που παρουσιάζουν μεταλλική στιλπνότητα.



3.5-27 Πολωτικό φίλτρο έχει χρησιμοποιηθεί στη φωτογράφιση των διπλανών εικόνων, που προφυλάσσονται από γυαλί. Η πρώτη έχει φωτογραφηθεί χωρίς φίλτρο και εμφανίζει έντονο φως από ανάκλαση. Με την παρεμβολή πολωτικού φίλτρου, στη δεύτερη φωτογραφία, το ανακλώμενο φως ανακόπτεται και εμφανίζεται η εικόνα.

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3 – 3

Υπολογισμός γωνίας ολικής πόλωσης από ανάκλαση στην ήρεμη επιφάνεια μιας πισίνας: Το ηλιακό φως εν μέρει ανακλάται και εν μέρει διαθλάται από την ήρεμη επιφάνεια του νερού μιας πισίνας.

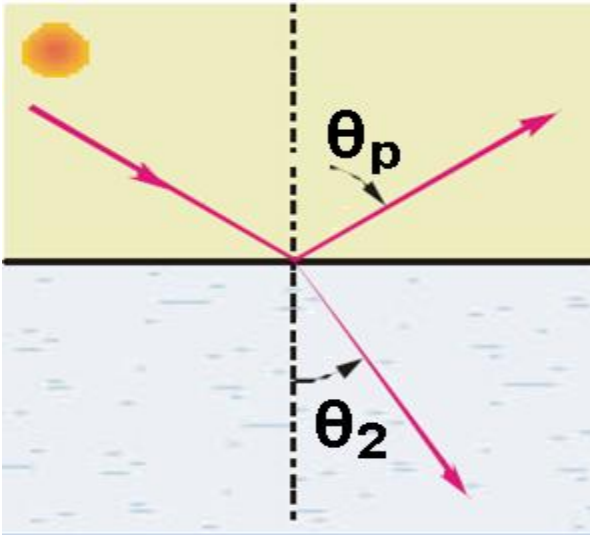
Το χλωριωμένο νερό της πισίνας έχει δείκτη διάθλασης  $n_2 = 1,35$ , ενώ ο αέρας  $n_1 = 1$ .

(α) Για ποια γωνία πρόσπτωσης το φως από ανάκλαση είναι ολικώς πολωμένο;

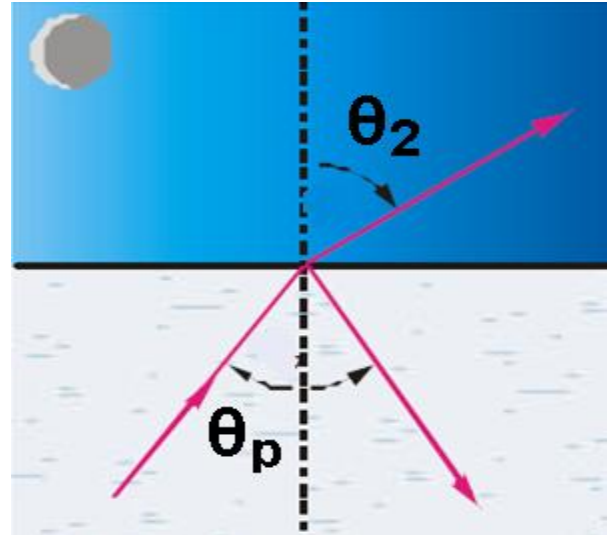
(β) Ποια είναι η γωνία διάθλασης του φωτός σ' αυτή την περίπτωση;

(γ) Αν το βράδυ η πισίνα φωτίζεται με προβολείς που είναι τοποθετημένοι στον πυθμένα της, ποιες είναι τότε οι τιμές των γωνιών των ερωτημάτων (α) και (β);





Ηλιακό φως την ημέρα



Φως προβολέων τη νύχτα

**ΛΥΣΗ** (α) Το φως προσπίπτει από τον αέρα στην επιφάνεια του νερού. Η γωνία ολικής πόλωσης δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\eta\mu\theta_p}{\sigma\upsilon\nu\theta_p} = \epsilon\phi\theta_p \Rightarrow 1,35 = \epsilon\phi\theta_p \Rightarrow \theta_p = 53,5^\circ$$

(β)  $\theta_2 + \theta_p = 90^\circ \Rightarrow \theta_2 + 53,5^\circ = 90^\circ \Rightarrow \theta_2 = 36,5^\circ$

(γ)  $\frac{n_1}{n_2} = \frac{\eta\mu\theta_p}{\sigma\upsilon\nu\theta_p} = \epsilon\phi\theta_p \Rightarrow \frac{1}{1,35} = \epsilon\phi\theta_p \Rightarrow \theta_p = 36,5^\circ$

$\theta_2 + \theta_p = 90^\circ \Rightarrow \theta_2 + 36,5^\circ = 90^\circ \Rightarrow \theta_2 = 53,5^\circ$

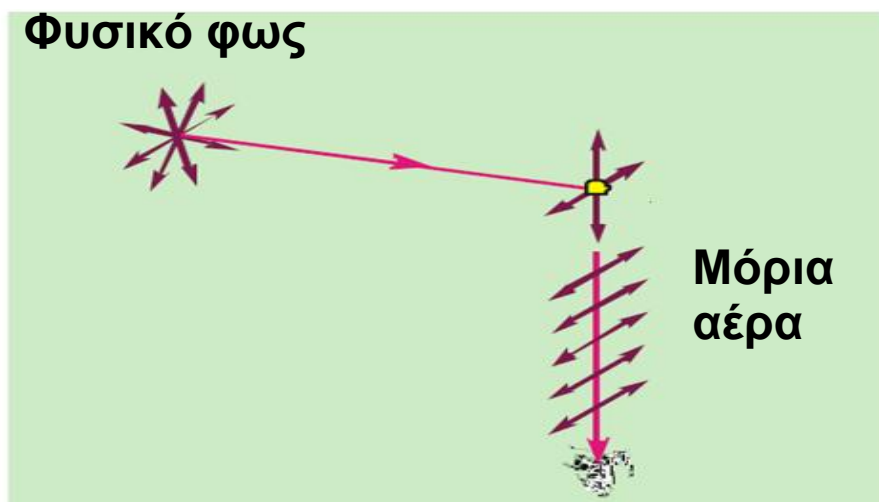
Παρατηρούμε ότι οι δύο γωνίες πόλωσης για τη διαχωριστική επιφάνεια νερού - αέρα είναι συμπληρωματικές.

### Πόλωση από σκέδαση - Κυανό χρώμα του ουρανού

Όταν το ορατό φως προσπίπτει σε ένα σύστημα σωματίων, απορροφάται από αυτά και επανεκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις χωρίς να αλλάζει η συχνότητα των διάφορων ακτινοβολιών του. Η απορρόφηση και η επανεκπομπή αυτή του φωτός ονομάζεται σκέδαση.

Επειδή το σκεδαζόμενο φως εκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις, βλέπουμε φως στον ουρανό, έστω κι αν δεν κοιτάμε κατευθείαν τον ηλιακό δίσκο. Μπορούμε

εύκολα να διαπιστώσουμε ότι το φως αυτό είναι μερικώς πολωμένο (σχήμα 1-28).



**3.5-28 Το φως που σκεδάζεται από μόρια του αέρα είναι μερικώς πολωμένο.**

Αν πάρουμε ένα πλακίδιο τύπου polaroid και το τοποθετήσουμε έτσι, ώστε το επίπεδο του να είναι οριζόντιο, θα διαπιστώσουμε ότι για διαφορετικές γωνίες του επιπέδου πόλωσής του περνάει φως διαφορετικής έντασης.

Το πολωμένο φως που προέρχεται από σκέδαση έχει επίπεδο ταλάντωσης κάθετο προς το επίπεδο που ορίζεται από την αρχική ακτίνα και τη σκεδασθείσα ακτίνα.

**Το σκεδαζόμενο φως περιέχει κατά προσέγγιση εννιά φορές περισσότερο κυανό χρώμα από το αντίστοιχο ερυθρό.**

Το πόσο ισχυρό θα είναι το σκεδαζόμενο φως εξαρτάται από το μήκος κύματος κάθε μονοχρωματικής ακτινοβολίας. Δηλαδή οι ακτινοβολίες που έχουν μικρότερα μήκη κύματος σκεδάζονται περισσότερο. Επομένως τα μικρότερα μήκη κύματος του ορατού φάσματος του φωτός (κυανό) σκεδάζονται περισσότερο από τα μεγαλύτερα μήκη κύματος (ερυθρό). Σ' αυτό το φαινόμενο οφείλεται το κυανό χρώμα του ουρανού.

Το φως που προσπίπτει σε ένα νέφος, χωρίς το κυανό χρώμα, όταν ανακλάται από το νέφος και γίνεται



τελικά ορατό από τον παρατηρητή, έχει κίτρινη έως ερυθρή απόχρωση.

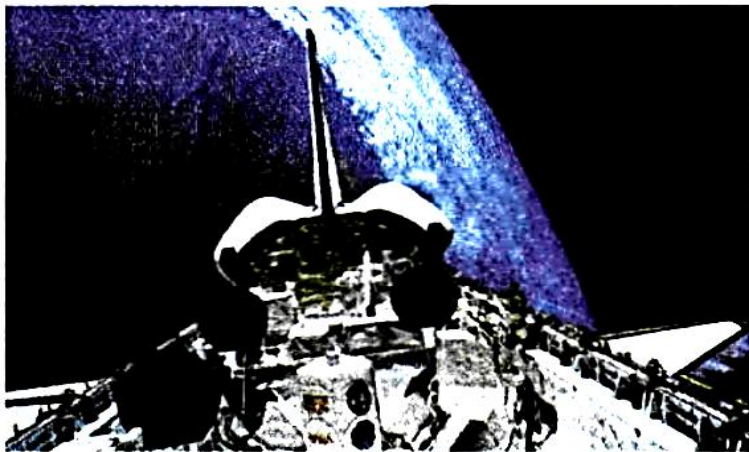


**3.5-29 Τα σύννεφα όπως φαίνονται κατά την ανατολή και τη δύση του Ήλιου.**

Κατά το σούρουπο το φως διανύει μεγάλη απόσταση μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα και ένα σημαντικό μέρος του κυανού χρώματος σκεδάζεται. Έτσι το φως που φθάνει κατευθείαν στα μάτια μας από τον ορίζοντα είναι φτωχό σε κυανό χρώμα.

Επίσης, όταν η ατμόσφαιρα είναι πλούσια σε υδρατμούς, αυτοί απορροφούν κυρίως το κυανό χρώμα. Έτσι έχουμε ενίσχυση της ερυθρής απόχρωσης του ουρανού.

Αν η Γη δεν είχε ατμόσφαιρα, δε θα μπορούσαμε να δούμε το χρώμα του ουρανού. Μαύρος θα ήταν την ημέρα, μαύρος και τη νύχτα. Οι αστροναύτες που βρίσκονται στο διάστημα βλέπουν μαύρο ουρανό, γιατί δεν υπάρχουν μόρια να σκεδάσουν το φως.



3.5-30 Η Γη και ο μαύρος ουρανός όπως φαίνονται από το διαστημικό λεωφορείο Columbia. Φωτογραφία της NASA.



3.5-31 Δύο εικόνες την ίδια στιγμή σε δύο τόπους με διαφορά 8 ωρών. Στην πρώτη το φως που φθάνει στους λουόμενους από σκέδαση είναι πολωμένο και περιέχει περίσσεια κυανού χρώματος. Στη δεύτερη το αρχικά λευκό φως υφίσταται την απώλεια αυτού τον κυανού χρώματος, καθώς διατρέχει την ατμόσφαιρα, και στον ορειβάτη φθάνει τελικά φως από το ερυθρό φάσμα του ορατού φωτός

**Οπτικώς ενεργά σώματα.**

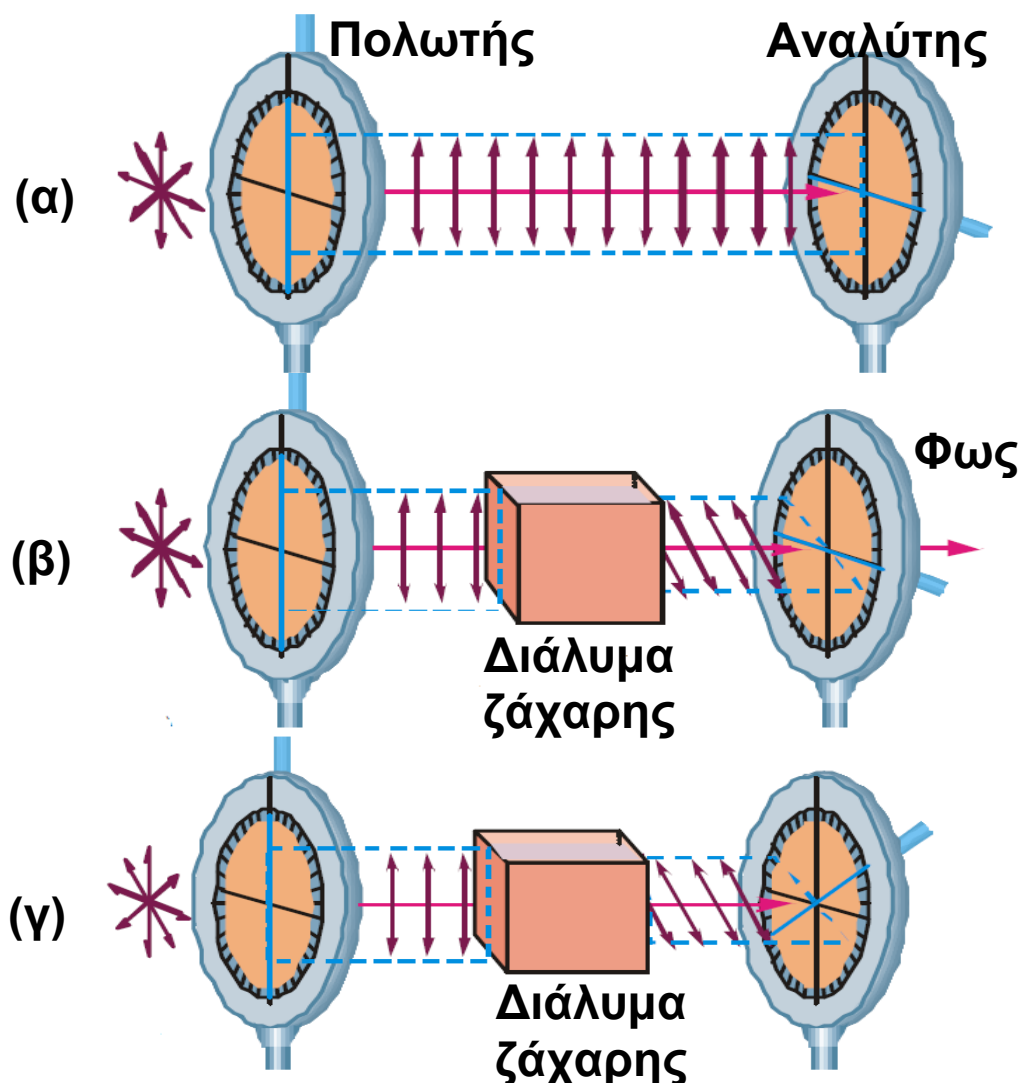
**Στροφή του επιπέδου πόλωσης του φωτός**

Υπάρχουν ορισμένα διαφανή σώματα που έχουν την ιδιότητα να στρέφουν το επίπεδο του πολωμένου φωτός, όταν αυτό περάσει από μέσα τους. Τα σώματα αυτά λέγονται οπτικώς ενεργά. Τέτοια είναι, για παράδειγμα, οι κρύσταλλοι χαλαζία, το διάλυμα ζάχαρης, το διάλυμα γαλακτικού οξέος κτλ.

Θεωρούμε πολωτή και αναλύτη (δεύτερο όμοιο πολωτή με τον πρώτο) διασταυρωμένους, ώστε η μονοχρωματική ακτίνα που προσπίπτει στον πολωτή να ανακόπτεται από τον αναλύτη (σχήμα 3.5-32α). Αν μεταξύ του πολωτή και του αναλύτη παρεμβάλουμε κρύσταλλο χαλαζία ή διάλυμα ζάχαρης, θα παρατηρήσουμε ότι από τον αναλύτη περνάει φως (3.5-32β). Αν στρίψουμε τον αναλύτη, τότε για ορισμένη γωνία το φως ανακόπτεται και πάλι (3.5-32γ).

Γίνεται φανερό ότι η παρεμβολή ενός οπτικά ενεργού σώματος έστρεψε το επίπεδο πόλωσης του πολωμένου φωτός κατά ορισμένη γωνία δεξιά ή αριστερά.

Διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της γωνίας στρέψης του πολωμένου φωτός ονομάζονται **πολωσίμετρα**.



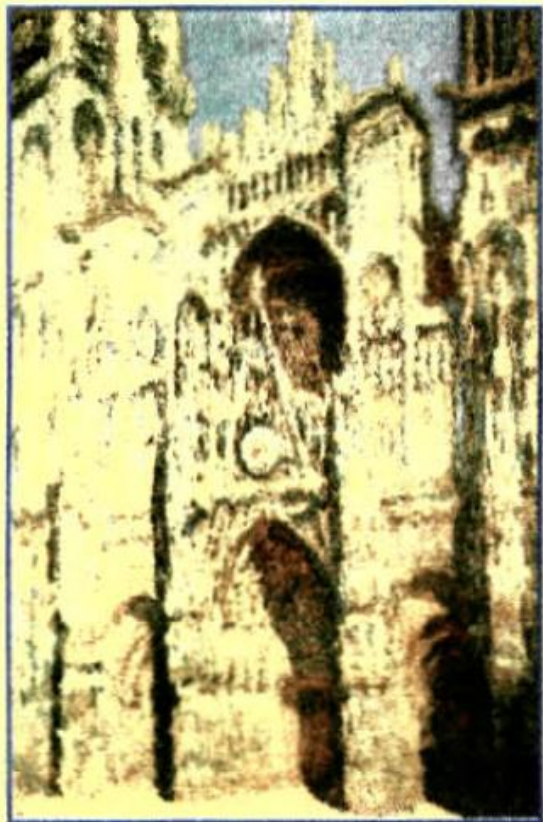


3.5-32 (α) Ο αναλύτης ανακόπτει το πολωμένο φως. (β) Το διάλυμα ζάχαρης προκαλεί στροφή τον επιπέδου ταλάντωσης του πολωμένου φωτός. Από τον αναλύτη περνάει φως. (γ) Με στροφή τον αναλύτη ανακόπτουμε πάλι το φως.

## Ελεύθερο ανάγνωσμα

« Κατά βάθος τα πάντα είναι ζήτημα φωτός »...

Το φως και οι μεγάλοι ζωγράφοι. Το φως «ζωγραφίζεται» από τους ιμπρεσιονιστές ζωγράφους παράλληλα με τις πρώτες επιστημονικές παρατηρήσεις για τη φύση του (Γαλλία, μέσα του 18ου αιώνα). Στο πέρασμά του τα υλικά αντικείμενα διαλύονται και καταγράφεται η στιγμιαία εντύπωση (impression). Το φως αναλύεται στα χρωματικά συστατικά του. Έτσι το ίδιο θέμα μπορεί να ξαναζωγραφιστεί, αφού αλλάζει η χρωματικότητά του στο πέρασμα της ημέρας.





**Κλοντ Μονέ (1840-1926),  
«Ο καθεδρικός ναός της Ρουέν» (1892-1893).**

Ο ζωγράφος Ζορζ Σερά (1859-1891), φοιτητής ακόμα, διαβάζει τις παρατηρήσεις πάνω στα οπτικά φαινόμενα του φυσικού Σαρλ Ανρύ. Στη ζωγραφική του η εικόνα συντίθεται από πολλές μικρές χρωματικές κουκκίδες (point). Σε κάθε περιοχή βρίσκονται κουκκίδες διαφορετικών καθαρών χρωμάτων. Από ορισμένη απόσταση τα χρωματικά συστατικά αναμειγνύονται οπτικά στον αμφιβληστροειδή, διατηρώντας την ένταση και τη λάμψη που έχει το φως εκείνη τη στιγμή. Ο ζωγραφικός αυτός τρόπος ονομάστηκε «πλουαντισμός».



Το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε ονομάζονται κύρια προσθετικά χρώματα του φωτός. Όταν συνδυάζονται κατάλληλα, μπορούν να δημιουργήσουν όλα τα χρώματα. Όταν συνδυάζονται ίδιες ποσότητες του κόκκινου, του πράσινου και του μπλε, το αποτέλεσμα είναι λευκό φως.



**Ζορζ Σερά, «Κυριακάτικος περίπατος στην Γκραντ Ζατ»  
(1884-1886)**



Απόσπασμα από το βιβλίο του Victor Weisskopf (Βίκτορ Βάισκοφ) Η κβαντική επανάσταση.

## **ΓΙΑΤΙ Ο ΟΥΡΑΝΟΣ ΕΙΝΑΙ ΓΑΛΑΝΟΣ;**

... η κβαντική θεωρία δεν είναι καθόλου απομακρυσμένη από τις ενασχολήσεις μας, αγγίζει τον ίδιο τον κόσμο όπου ζούμε και επιτρέπει να κατανοήσουμε τις πιο λεπτές δομές της ύλης. Καλώς ή κακώς, μας έχει παράσχει τη δυνατότητα ελέγχου μερικών ενεργειακών διαδικασιών από τις πιο ισχυρές του σύμπαντος.

Εντούτοις θα ήθελα να προσθέσω στην επιχειρηματολογία μου ένα επιπλέον στοιχείο, το οποίο είμαι βέβαιος ότι θα δείξει πως η κβαντική θεωρία της αλληλεπίδρασης του φωτός με την ύλη επιτρέπει να απαντήσουμε σε ερωτήσεις πολύ συνηθισμένες, του τύπου:

Γιατί ο ουρανός είναι γαλανός;

Γιατί το νερό είναι διαφανές;

Τι είναι αυτό που κάνει το αντικείμενο να φαίνεται χρωματιστό;

Ή ακόμη, γιατί το μέταλλο είναι στιλπνό;

Ο αναγνώστης θα μου επιτρέψει να μη θίξω παρά μόνο την περίπτωση του γαλανού ουρανού, για να αποφύγω μια περίπλοκη παρουσίαση, που, ακόμη και στη μοναδική αυτή περίπτωση, θα παραμείνει σχηματική. Πώς η κβαντική θεωρία εξηγεί την απορρόφηση του φωτός από ένα σώμα, με άλλα λόγια, από ένα άτομο ή ένα μόριο;

Ας φανταστούμε ένα άτομο ή ένα μόριο βυθισμένο στο πεδίο ενός φωτεινού κύματος σαφώς καθορισμένου χρώματος. Με κβαντικούς όρους, ένα τέτοιο κύμα περιγράφεται ως ένα σύνολο φωτονίων

που έχουν όλα την ίδια ενέργεια  $hf$ , η συχνότητα  $f$  αντιστοιχεί στο χρώμα του εν λόγω φωτός. Όσο για το άτομο, η κβαντική θεωρία το περιγράφει ως ένα σύστημα του οποίου η ενέργεια είναι κβαντωμένη, δηλαδή παρουσιάζει μια αλληλουχία ενεργειακών επιπέδων, διαχωρισμένων μεταξύ τους: η ενέργεια ενός ατόμου δεν μπορεί να λάβει παρά ορισμένες τιμές, τις τιμές αυτών των επιπέδων, οι οποίες είναι χαρακτηριστικές γι' αυτό το άτομο ή, ακριβέστερα, για το είδος στο οποίο ανήκει (άνθρακας, άζωτο κτλ.).

Στην κανονική κατάσταση, που ονομάζεται μη διεγερμένη, το άτομο βρίσκεται σ' αυτήν από τις επιτρεπόμενες καταστάσεις που χαρακτηρίζεται από την ελάχιστη ενέργεια. Λέμε ότι βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάστασή του. Όταν δέχεται φωτεινή ενέργεια, που μεταφέρουν τα φωτόνια συχνότητας  $f$ , μπορεί να περάσει σε μια ανώτερη ενεργειακή κατάσταση, υπό τον όρο πάντοτε η ενέργεια των φωτονίων  $hf$  να είναι ακριβώς ίση με τη διαφορά μεταξύ ενός από τα επιτρεπόμενα ενεργειακά επίπεδα και του θεμελιώδους.

Αν είναι έτσι τα πράγματα, το άτομο απορροφά ένα φωτόνιο, το οποίο εξαφανίζεται από την προσπίπτουσα δέσμη, και οδηγείται σε μια ανώτερη ενεργειακή κατάσταση. Ονομάζουμε αυτές τις απορροφήσεις «συντονισμένες απορροφήσεις» ή απλώς «συντονισμούς».

Θα εισαγάγω τώρα, για άλλη μία φορά, ένα μοντέλο εύχρηστο για την περιγραφή του ατόμου. Ας φανταστούμε τα ηλεκτρόνιά του ως μικρούς ταλαντωτές, ικανούς να πάλλονται υπό την επίδραση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος και των οποίων οι ιδιοσυχνότητες (δηλαδή οι συχνότητες για τις οποίες το ηλεκτρόνιο συντονίζεται παλλόμενο με μέγιστο πλάτος) αντιστοιχούν σε μεταβάσεις του ατόμου από τη θεμελιώδη κατάσταση σε μια από τις διεγερμένες.

Με άλλα λόγια, οι ιδιοσυχνότητες του ταλαντωτή, που μας χρησιμεύει ως μοντέλο του ατόμου, είναι ίσες με τις συχνότητες του κβαντικού συντονισμού.

Ας εξετάσουμε την επίδραση του φωτός στα άτομα μέσω του παραπάνω μοντέλου. Μπορούμε στο εξής να αγνοήσουμε τα φωτόνια και τις κβαντικές καταστάσεις του ατόμου: αυτό το μοντέλο επιτρέπει πράγματι να θεωρήσουμε το φως ως ένα κλασικό ηλεκτρομαγνητικό κύμα, που επιδρά σε κλασικούς ταλαντωτές, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από ης ιδιοσυχνότητές τους. Υπό την επίδραση ενός φωτεινού κύματος ο ταλαντωτής αρχίζει να πάλλεται. Η απόκριση του ταλαντωτή είναι ασήμαντη (αλλά μη μηδενική), όταν η συχνότητα του προσπίπτοντος κύματος είναι διαφορετική από τις ιδιοσυχνότητές του, ενώ αντίθετα γίνεται πολύ σημαντική, όταν οι συχνότητες του κύματος και του ταλαντωτή συμπίπτουν, όταν έχουμε συντονισμό.

Ποιες είναι λοιπόν οι συχνότητες συντονισμού των διάφορων ατόμων και μορίων; Για την πλειονότητα των απλών ατόμων (O, N, H) είναι αρκετά υψηλότερες από αυτές που χαρακτηρίζουν το ορατό φως. Ανήκουν στην περιοχή του φάσματος η οποία ονομάζεται υπεριώδης. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο ένα αέριο είναι διαφανές.

Για τα μόρια ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2O$ ) οι συχνότητες συντονισμού είναι χαμηλότερες από τις ορατές συχνότητες του υπερύθρου και μέσα στο υπεριώδες, άρα, και σ' αυτή την περίπτωση, βρίσκονται έξω από το ορατό φάσμα. Υπάρχει όμως μια σημαντική διαφορά: στην περίπτωση των ατόμων οι μάζες που ταλαντώνονται είναι αυτές των ηλεκτρονίων. Στην περίπτωση των μορίων, οι μάζες που ταλαντώνονται είναι αυτές των ατόμων και συνεπώς είναι πολύ βαρύτερες από ό,τι στην πρώτη περίπτωση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα και το αυτό κύμα να θέτει πολύ ευκολότερα σε κίνηση

τους ταλαντωτές που αντιστοιχούν σε άτομα από ό,τι εκείνους που αντιστοιχούν σε μόρια (\*).

Τώρα λοιπόν μπορούμε να κατανοήσουμε ένα από τα ωραιότερα χρώματα της φύσης: το γαλανό του ουρανού. Το ηλιακό φως αποτελείται, όπως είναι γνωστό, από ένα σύνολο ακτινοβολιών που περιλαμβάνει όλες τις δυνατές συχνότητες του φάσματος, από το υπεριώδες έως το υπέρυθρο, μέσω του ορατού. Ας εξετάσουμε την επίδραση αυτών των ποικίλων ακτινοβολιών στους ταλαντωτές που απαρτίζουν τα άτομα και τα μόρια μέσα στην ατμόσφαιρα. Οι υπέρυθρες ακτινοβολίες προκαλούν το συντονισμό των μορίων, αλλά τα αντίστοιχα πλάτη είναι μικρά, όπως μόλις αναφέρθηκε. Αντίθετα οι υπεριώδεις ακτινοβολίες προκαλούν το συντονισμό των ατόμων και τα αντίστοιχα πλάτη είναι σημαντικά. Όσο για το ορατό φως, θέτει σε κίνηση τους ταλαντωτές με ένα πλάτος ταλάντωσης σχετικά μικρό, αλλά το ίδιο για όλους, αφού οι ταλαντωτές που περιλαμβάνονται δε συντονίζονται στο ορατό. Συνολικά, το ηλιακό φως προκαλεί ταλαντώσεις μέσου ή μικρού πλάτους στο ορατό, αμελητέου στο υπέρυθρο και πολύ μεγάλου στο υπεριώδες.

Επιπλέον πρέπει να λάβουμε υπόψη μας ότι ένα ταλαντούμενο φορτίο, όπως συμβαίνει να είναι το ηλεκτρόνιο ενός ατόμου που εξαναγκάζεται σε ταλάντωση, είναι επίσης πομπός φωτός. Εδώ έχουμε ένα από τα θεμελιώδη συμπεράσματα της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας του Maxwell. Ένα ταλαντούμενο ηλεκτρόνιο εκπέμπει προς όλες τις κατευθύνσεις ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα (με άλλα λόγια, φως), του οποίου η συχνότητα είναι ίση με την ιδιοσυχνότητα της ταλάντωσης του, αυτό που ονομάζεται σκέδαση Rayleigh. Εξάλλου αποδεικνύεται ότι η ένταση της εν λόγω εκπομπής είναι ανάλογη με την τέταρτη δύναμη αυτής της συχνότητας.

Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν ότι τα μόρια του αέρα που φωτίζονται από τον Ήλιο εκπέμπουν φως και ακόμη ότι αυτή η εκπομπή είναι εντονότερη στο κυανό από ό,τι στο ερυθρό, αφού η συχνότητα του κυανού φωτός είναι περίπου διπλάσια από εκείνη του ερυθρού. Έτσι, όταν βλέπουμε τον ουρανό, χωρίς να κοιτάμε τον ηλιακό δίσκο, τον βλέπουμε γαλανό: είναι το αποτέλεσμα της δύναμης του 4.

(\*) Σημείωση συγγραφέων: Αυτό σημαίνει ότι το πλάτος ταλάντωσης των δομικών μονάδων των μορίων (άτομα) είναι μικρότερο από το πλάτος ταλάντωσης των ατομικών ταλαντωτών (ηλεκτρόνια) στην περίπτωση του συντονισμού.

## **ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ**

---

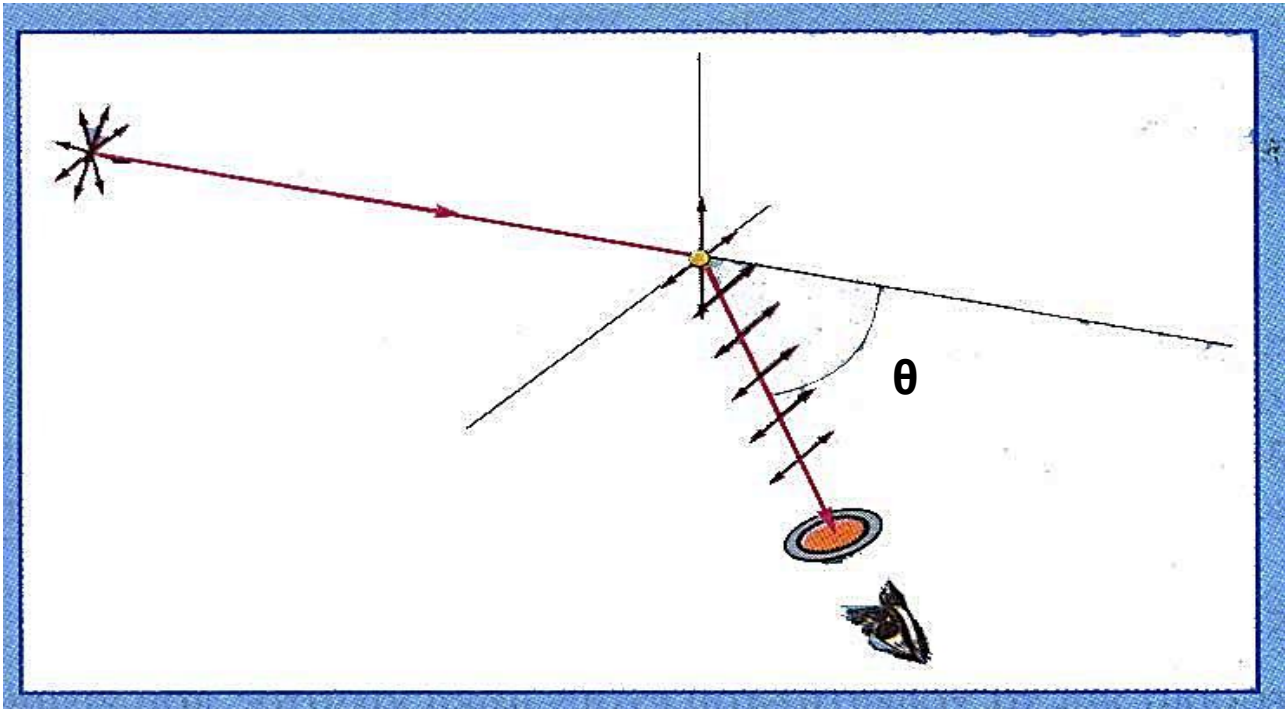
### **ΠΟΛΩΣΗ ΑΠΟ ΣΚΕΔΑΣΗ**

Ο σκοπός της δραστηριότητας αυτής είναι να διαπιστώσουμε ότι το φως που προέρχεται από τον ουρανό είναι μερικώς πολωμένο.

Μια ηλιόλουστη, ανέφελη μέρα κοιτάξτε το γαλανό ουρανό πίσω από ένα φύλλο polaroid, που το κρατάτε κοντά στο ένα μάτι, ώστε να βλέπετε ένα μεγάλο τμήμα του ουρανού. Κατευθύνετε στη συνέχεια το polaroid, ώστε να βλέπετε μια περιοχή του ουρανού με ένα ελάχιστο της έντασης του φωτός. Το φως που φτάνει στο μάτι σας από αυτό το τμήμα του ουρανού είναι ισχυρά πολωμένο.



Μετρήστε στο περίπου τη γωνία που σχηματίζεται από τη γραμμή που συνδέει το κεφάλι σας και την περιοχή του ουρανού με το φως μέγιστης πόλωσης, καθώς και τη γραμμή που συνδέει τον Ήλιο με την ίδια περιοχή του ουρανού, δηλαδή τη γωνία  $\theta$ . Θα πρέπει να βρείτε γωνία κοντά στις  $90^\circ$ .



Μπορείτε να μετρήσετε επίσης επίσης την κατεύθυνση του άξονα της πόλωσης του φωτός που φτάνει στα μάτια σας από την περιοχή του ουρανού με μέγιστη πόλωση. Αυτή την κατεύθυνση σας τη φανερώνει ο οπτικός άξονας του φύλλου Polaroid που χρησιμοποιείτε. Αρκεί επομένως να γνωρίζετε τον οπτικό άξονα του polaroid σας.





Αν δεν τη γνωρίζετε, μπορείτε να τη βρείτε κοιτάζοντας μία φωτεινή πηγή γνωστής πόλωσης, π.χ. το φως που ανακλάται από ένα τζάμι ή από ένα γυαλιστερό πάτωμα. Όπως γνωρίζουμε, το ανακλώμενο φως είναι πολωμένο παράλληλα προς την επιφάνεια ανάκλασης, π.χ. το γυαλιστερό μαρμάρινο πάτωμα.

## ΣΥΝΟΨΗ 3ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

◆ Το φως έχει διπλή φύση. Συμπεριφέρεται ως κύμα και ως σωματίο που ονομάζεται φωτόνιο. Σε φαινόμενα όπως η συμβολή, η περίθλαση και η πόλωση εκδηλώνεται η κυματική φύση του φωτός (ηλεκτρομαγνητικό κύμα), ενώ σε φαινόμενα που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση του φωτός με την ύλη (απορρόφηση - εκπομπή), όπως το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, εκδηλώνεται η σωματιδιακή φύση του φωτός.

◆ Σύμφωνα με τη θεωρία του Maxwell, το φως είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία ξεκινούν από τη φωτεινή πηγή και διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις.

◆ Σύμφωνα με την κβαντική θεωρία του Planck, το φως (και γενικότερα κάθε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) εκπέμπεται και απορροφάται από τα άτομα της ύλης όχι κατά συνεχή τρόπο αλλά ασυνεχώς. Δηλαδή κάθε άτομο εκπέμπει ή απορροφά στοιχειώδη ποσά ενέργειας, που ονομάζονται κβάντα φωτός ή φωτόνια.

◆ Το φως, όπως και κάθε ηλεκτρομαγνητικό κύμα, διαδίδεται στο κενό με σταθερή ταχύτητα περίπου  $3 \times 10^8$  m/s. Η τιμή της ταχύτητας του φωτός στο κενό είναι μια θεμελιώδης σταθερά της φύσης.

◆ Το πηλίκο της ταχύτητας  $c_0$  του φωτός στο κενό προς την ταχύτητα  $c$  μέσα σε κάποιο υλικό ονομάζεται δείκτης διάθλασης  $n$  του υλικού μέσου. Ισχύει δηλαδή:

$$n = \frac{\text{ταχύτητα του φωτός στο κενό } c_0}{\text{ταχύτητα του φωτός στο μέσο } c} = \frac{c_0}{c}$$

◆ Σε ένα υλικό οπτικό μέσο η ταχύτητα του φωτός είναι διαφορετική για διαφορετικά μήκη κύματος. Ο δείκτης διάθλασης του μέσου δεν είναι σταθερός, αλλά εξαρτάται από το μήκος κύματος του φωτός. Το φαινόμενο αυτό, δηλαδή η εξάρτηση της ταχύτητας του κύματος και του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος, ονομάζεται διασκεδασμός.

◆ Το ορατό φως έχει όρια και τα χρώματά του έχουν μήκη κύματος που κυμαίνονται μεταξύ 400nm του ιώδους και 700nm του ερυθρού. Εκτός από την ακτινοβολία της ορατής περιοχής του φάσματος υπάρχει και ακτινοβολία αόρατη, η οποία βρίσκεται πέρα από την ιώδη περιοχή, με μήκη κύματος μικρότερα των 400nm. Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται υπεριώδης ακτινοβολία. Μετά την ερυθρή περιοχή του φάσματος υπάρχει αόρατη ακτινοβολία με μήκη κύματος μεγαλύτερα των 700nm, η οποία προκαλεί έντονη αύξηση της θερμοκρασίας των στερεών και υγρών σωμάτων. Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται υπέρυθη ακτινοβολία.

◆ Το φυσικό φως είναι σύνθεση πολλών κυμάτων με διάφορα επίπεδα ταλάντωσης των ηλεκτρικών τους πεδίων και τυχαίες διευθύνσεις διάδοσης. Το φυσικό φως που δεχόμαστε απευθείας από μία φωτεινή πηγή, επειδή προέρχεται από πολλά άτομα ή μόρια, έχει πολλά επίπεδα ταλάντωσης και συνεπώς δεν είναι πολωμένο.

◆ Για την πόλωση του φυσικού φωτός χρησιμοποιούμε ειδικά πολωτικά φίλτρα. Μετά τη χρήση του φίλτρου το επίπεδο ταλάντωσης του

κύματος είναι αυτό που καθορίζεται από το υλικό του φίλτρου. Η συσκευή που περιέχει το πολωτικό φίλτρο ονομάζεται πολωτής.

◆ Η γωνία ολικής πόλωσης του φωτός, για κάθε μέσο, είναι εκείνη η γωνία πρόσπτωσης για την οποία η ανακλώμενη ακτίνα και η διαθλώμενη είναι κάθετες μεταξύ τους. Τα γυαλιά ηλίου που διαθέτουν απορροφητικό φίλτρο polaroid έχουν τέτοια κατασκευή, ώστε το χαρακτηριστικό επίπεδο πόλωσής τους να είναι κατακόρυφο και να απορροφούν στο μέγιστο δυνατό την οριζόντια συνιστώσα του ανακλώμενου φωτός. Έτσι στα μάτια φτάνει ένα μικρό ποσοστό του πολωμένου φωτός.

◆ Όταν το ορατό φως προσπίπτει σε ένα σύστημα σωματίων, απορροφάται από αυτά και επανεκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις, χωρίς να αλλάζει η συχνότητα των διάφορων ακτινοβολιών του. Η απορρόφηση και η επανεκπομπή αυτή του φωτός ονομάζεται σκέδαση.

## ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1. Οι αστρονόμοι ισχυρίζονται ότι η σημερινή εικόνα ενός γαλαξία στο τηλεσκόπιο αφορά κάποια στιγμή του παρελθόντος του. Πώς εξηγείτε αυτό τον ισχυρισμό;
2. Τι είναι το φως σύμφωνα με τη θεωρία του Maxwell;
3. Πώς ερμηνεύει η κβαντική θεωρία του Planck την εκπομπή και την απορρόφηση του φωτός;
4. Εξηγήστε γιατί, όταν φως διαπερνά μία διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών μέσων, η συχνότητά του παραμένει αμετάβλητη.
5. Εξηγήστε γιατί το μήκος κύματος μίας μονοχρωματικής ακτινοβολίας, που διαδίδεται σε δύο οπτικά υλικά μέσα, έχει μικρότερη τιμή στο πυκνότερο μέσο σε σχέση με αυτήν που έχει στο αραιότερο.

- 6.** Όταν το φως μεταβαίνει από ένα μέσο σε κάποιο άλλο δεν μεταβάλλονται:
- α. το μήκος κύματος και η ταχύτητά του.
  - β. η συχνότητα και το μήκος κύματος του.
  - γ. η ταχύτητά του και η ενέργεια των φωτονίων.
  - δ. η ενέργεια των φωτονίων και η συχνότητά του.
- 7.** Σημειώστε με Σ ή Λ όποιες από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστές ή λάθος αντίστοιχα:
- α. Το φως διαδίδεται σε όλα τα οπτικά υλικά μέσα με ταχύτητα περίπου  $3 \times 10^8$  m/s.
  - β. Το φως διαδίδεται στο κενό με ταχύτητα περίπου  $3 \times 10^8$  m/s.
  - γ. Η ταχύτητα του φωτός μικραίνει, όταν το φως περνά από πυκνότερο σε αραιότερο οπτικό υλικό μέσο.
  - δ. Η ταχύτητα του φωτός μικραίνει, όταν το φως περνά από αραιότερο σε πυκνότερο οπτικό υλικό μέσο.
- 8.** Ποιο φαινόμενο ονομάζεται διασκεδασμός του φωτός;
- 9.** Κατά την ανάλυση του λευκού φωτός παίρνουμε μία ταινία με διάφορα χρώματα. Μπορείτε να εξηγήσετε γιατί συμβαίνει αυτό;
- 10.** Φως μεγαλύτερου μήκους κύματος (ερυθρό) έχει μεγαλύτερη ταχύτητα σε ένα μέσο από φως μικρότερου μήκους κύματος (ιώδες); Να εξηγήσετε πως διαπιστώνουμε αυτό το γεγονός.
- 11.** Δύο μονοχρωματικές ακτίνες φωτός, η κόκκινη και η κίτρινη, εκτρέπονται από γυάλινο πρίσμα. Ποιες από τις προτάσεις που ακολουθούν είναι σωστές;
- α. Η γωνία εκτροπής της κόκκινης είναι μικρότερη από την αντίστοιχη της κίτρινης.
  - β. Η γωνία εκτροπής της κόκκινης είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της κίτρινης.

- γ. Η κόκκινη ακτίνα διαδίδεται στο γυαλί με μεγαλύτερη ταχύτητα από ό,τι η κίτρινη.  
δ. Η κόκκινη και η κίτρινη ακτίνα διαδίδονται στο γυαλί με την ίδια ταχύτητα.

**12.** Οι δείκτες διάθλασης ενός τυπικού γυαλιού, που ακολουθούν, αντιστοιχούν σε καθένα από τα χρώματα. Να κάνετε την αντιστοιχία χρώματος - δείκτη διάθλασης.

Ιώδης	1,530
Μπλε	1,520
Πράσινο	1,517
Κίτρινο	1,512
Πορτοκαλί	1,525
Κόκκινο	1,508

**13.** Ποια είναι τα χαρακτηριστικά του φωτός σε σχέση με τη διάδοσή του σε οπτικά μέσα;

**14.** Η γωνία εκτροπής κάθε χρώματος, όταν αυτό διέρχεται από πρίσμα:

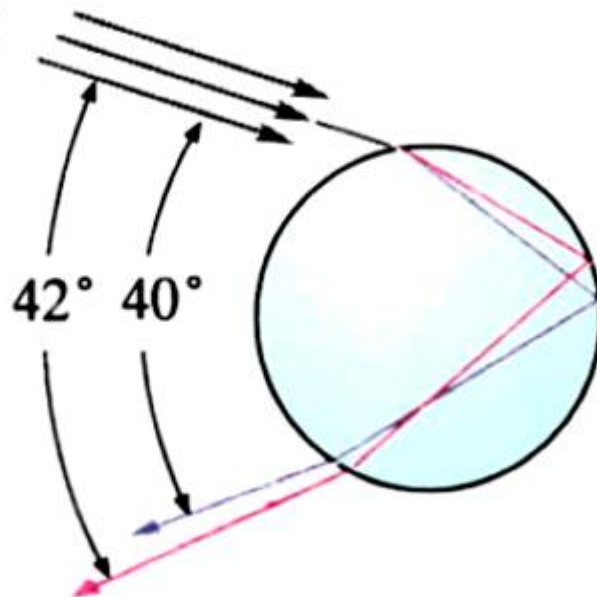
- α. είναι τόσο μικρότερη, όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος του χρώματος.  
β. είναι τόσο μικρότερη όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος του χρώματος.  
γ. δεν εξαρτάται από το μήκος κύματος του χρώματος.  
δ. είναι ίδια για όλα τα χρώματα.

**15.** Ο δείκτης διάθλασης ενός οπτικού μέσου:

- α. είναι ίδιος για όλα τα χρώματα.  
β. αυξάνεται όσο αυξάνεται το μήκος κύματος του χρώματος.  
γ. ελαττώνεται όσο αυξάνεται το μήκος κύματος του χρώματος.  
δ. είναι χαρακτηριστικό μόνο του υλικού του οπτικού μέσου.

**16.** Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε το ηλιακό φως να προσπίπτει σε σταγόνα βροχής. Ποια φαινόμενα παρατηρούνται κατά την πορεία των ακτίνων;

Ηλιακό φως



**17.** Το χρώμα του ουρανού είναι μπλε, γιατί...

α. τα μόρια του αέρα είναι μπλε.

β. η ίριδα των ματιών μας είναι μπλε.

γ. η σκέδαση του φωτός είναι εντονότερη στα μικρά μήκη κύματος.

δ. η σκέδαση του φωτός είναι εντονότερη στα μεγάλα μήκη κύματος.

Ποια από τις παραπάνω προτάσεις είναι η σωστή;

**18.** Τι είναι τα πολωτικά φίλτρα ή πολωτές;

**19.** Χρησιμοποιούμε γυαλιά τύπου polaroid, για να «κόψουμε», όσο το δυνατόν, την αντηλιά (έντονη ανάκλαση) του φωτός που προκαλούν λείες επιφάνειες όταν το φως προσπίπτει σ' αυτές (λόγου χάρη στην επιφάνεια της θάλασσας, όταν επικρατεί μπονάτσα).

Ποια πρέπει να είναι η διεύθυνση της πόλωσης του υλικού polaroid, για να είναι τα γυαλιά αποτελεσματικά;



**20.** Να αναφέρετε τρεις τουλάχιστον ιδιότητες της υπεριώδους ακτινοβολίας οι οποίες μας πληροφορούν για την ύπαρξή της.

**21.** Με ποιο τρόπο αντιλαμβανόμαστε ότι πέρα από την ερυθρή περιοχή του φάσματος του ορατού φωτός υπάρχει αόρατη υπέρυθη ακτινοβολία;

**22.** Πώς ονομάζονται τα όργανα με τα οποία ανιχνεύεται η υπέρυθη ακτινοβολία και σε ποια αρχή βασίζεται η λειτουργία τους;

**23.** Τι ονομάζουμε φυσικό και τι γραμμικά πολωμένο φως;

**24.** Γιατί οι αστροναύτες, όταν βρίσκονται στη Σελήνη, βλέπουν μαύρο τον ουρανό;

**25.** Μπορούμε με έναν πολωτή να αντιληφθούμε ότι το φως κάποιας πηγής που φθάνει στα μάτια μας είναι πολωμένο ή όχι; Μήπως είναι απαραίτητο να έχουμε δύο όμοιους πολωτές; Εξηγήστε γιατί.

**26.** Τι ονομάζουμε γωνία ολικής πόλωσης; Να γράψετε το νόμο του Brewster.

**27.** Σημειώστε με  $\Sigma$  ή  $\Lambda$  όποιες από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστές ή λάθος αντίστοιχα:

- α. μερικώς πολωμένο,
- β. μόνο γραμμικά πολωμένο,
- γ. μη πολωμένο.

## ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Για την επίλυση των προβλημάτων να θεωρηθούν γνωστά: σταθερά του Planck  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ , η ταχύτητα του φωτός στον αέρα  $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

1. Σε ένα πείραμα μέτρησης της ταχύτητας του φωτός με τη μέθοδο του Fizeau η απόσταση μεταξύ της φωτεινής πηγής και του κατόπτρου είναι 12945m και ο τροχός έχει 720 διάκενα.

Να υπολογίσετε την ελάχιστη συχνότητα περιστροφής του τροχού αυτού, αν η πειραματική ταχύτητα του φωτός που προέκυψε ήταν  $2,982 \times 10^8 \text{ m/s}$ .

2. Μία δέσμη φωτός που διαδίδεται στο κενό έχει μήκος κύματος 600nm:

α. Να υπολογίσετε την ταχύτητα διάδοσης αυτής της δέσμης σε γυαλί με δείκτη διάθλασης 1,6.

β. Ποια τιμή έχει το μήκος κύματος της δέσμης, όταν αυτή διαδίδεται στο γυαλί; Δίνεται ότι η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι  $300000 \text{ km/s}$ .

3. Μονοχρωματική ακτίνα φωτός ορισμένης συχνότητας έχει μήκος κύματος 500nm, όταν διαδίδεται στο νερό. Να υπολογιστεί το μήκος κύματος αυτού του φωτός, όταν διαδίδεται στο βενζόλιο. Οι δείκτες διάθλασης του νερού και του βενζολίου είναι αντίστοιχα 1,333 και 1,501.

4. Φως έχει μήκος κύματος 560nm στο κενό. Όταν διαδίδεται στο νερό, έχει ταχύτητα  $2,25 \times 10^8 \text{ m/s}$ . Αν το φως αυτό διαδιδόταν στο νερό, ποιο θα ήταν τότε το μήκος κύματος του;

5. Φως που διαδίδεται στο κενό έχει μήκος κύματος  $\lambda_0$ . Όταν το ίδιο φως διαδίδεται στην αιθανόλη, έχει μήκος κύματος 440nm και στη γλυκερίνη 405nm. Ποιος είναι ο

λόγος του δείκτη διάθλασης της αιθανόλης προς το δείκτη διάθλασης της γλυκερίνης σε μήκος κύματος  $\lambda_0$ .

**6.** Φυσικό φως που διαδίδεται στον αέρα συναντά λεία επιφάνεια πάγου. Η ανακλώμενη ακτίνα βρέθηκε ολικώς πολωμένη. Να προσδιορίσετε τη γωνία πρόσπτωσης. Ο δείκτης διάθλασης του πάγου είναι 1,309.

**7.** Μονοχρωματική δέσμη φωτός που διαδίδεται στο νερό προσπίπτει σε γυάλινο κύβο, ο οποίος είναι βυθισμένος εξ ολοκλήρου στο νερό, υπό γωνία πρόσπτωσης  $50^\circ$ . Ένα μέρος της δέσμης ανακλάται, ενώ το άλλο διαθλάται. Αν η γωνία διάθλασης και η γωνία ανάκλασης έχουν άθροισμα  $90^\circ$ , να υπολογίσετε το δείκτη διάθλασης του γυάλινου κύβου για το φως αυτό, αν ο δείκτης διάθλασης του νερού είναι 1,333.

**8.** Μονοχρωματική δέσμη φυσικού φωτός που διαδίδεται στον αέρα προσπίπτει στη λεία επιφάνεια ενός κρυστάλλου χαλαζία υπό γωνία  $57^\circ$  (ως προς την κάθετο στο σημείο πρόσπτωσης). Η ανακλώμενη δέσμη βρέθηκε ότι είναι ολικώς πολωμένη:

- α. Πόσος είναι ο δείκτης διάθλασης του χαλαζία;
- β. Πόση είναι η γωνία διάθλασης;

**9.** Ένας ραδιοφωνικός σταθμός εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας 100MHz.

- α. Πόση είναι η ενέργεια ενός φωτονίου αυτής της ακτινοβολίας;
- β. Να συγκρίνετε το αποτέλεσμα με την ενέργεια κάποιας ορατής ακτινοβολίας π.χ. του κίτρινου φωτός, μήκους κύματος 600nm στο κενό.
- γ. Να βρείτε τον αριθμό των φωτονίων που εκπέμπονται ανά δευτερόλεπτο, αν η ισχύς που ακτινοβολείται είναι 6,63kW.

**10.** Αν υποθέσουμε ότι το ανθρώπινο μάτι μπορεί να αισθανθεί φως μήκους κύματος  $\lambda = 600\text{nm}$  όταν προσπίπτουν σ' αυτό τουλάχιστον 100 φωτόνια ανά δευτερόλεπτο, να υπολογίσετε:

- α. τη συχνότητα του κύματος,
- β. την ολική ενέργεια ανά δευτερόλεπτο που δέχεται το μάτι.

**11.** Μονοχρωματικό φως μήκους κύματος  $\lambda_0 = 600\text{nm}$ , που διαδίδεται στον αέρα εισέρχεται ταυτόχρονα σε δύο οπτικά υλικά πάχους 1m, κάθετα στην διαχωριστική επιφάνεια του κάθε υλικού με τον αέρα. Οι δείκτες διάθλασης των δύο υλικών είναι  $n_1 = 1,5$  και  $n_2 = 1,2$ . Να βρείτε:

- α. τη χρονική διαφορά εξόδου του φωτός από τα δύο οπτικά υλικά.
- β. τον αριθμό των μηκών κύματος του φωτός σε κάθε οπτικό υλικό.

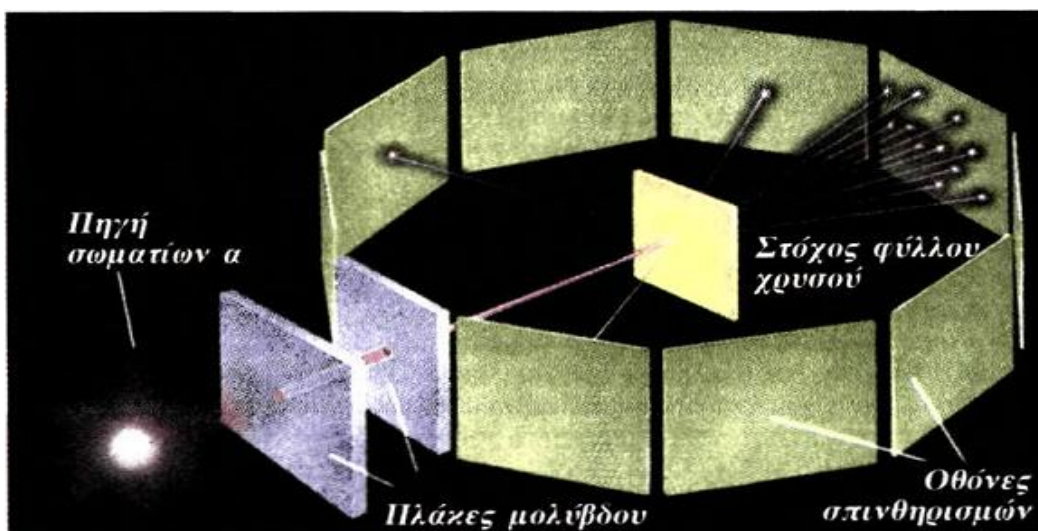
**12.** Ακτινοβολία συχνότητας  $10^{12}\text{Hz}$  απορροφάται πλήρως από μία ποσότητα νερού, οπότε αυξάνεται η θερμοκρασία του νερού κατά  $2^\circ\text{C}$ . Αν γνωρίζετε ότι για να αυξηθεί η θερμοκρασία της παραπάνω ποσότητας κατά  $1^\circ\text{C}$  απαιτείται ενέργεια 21216J, πόσα φωτόνια της ακτινοβολίας απορροφούνται;



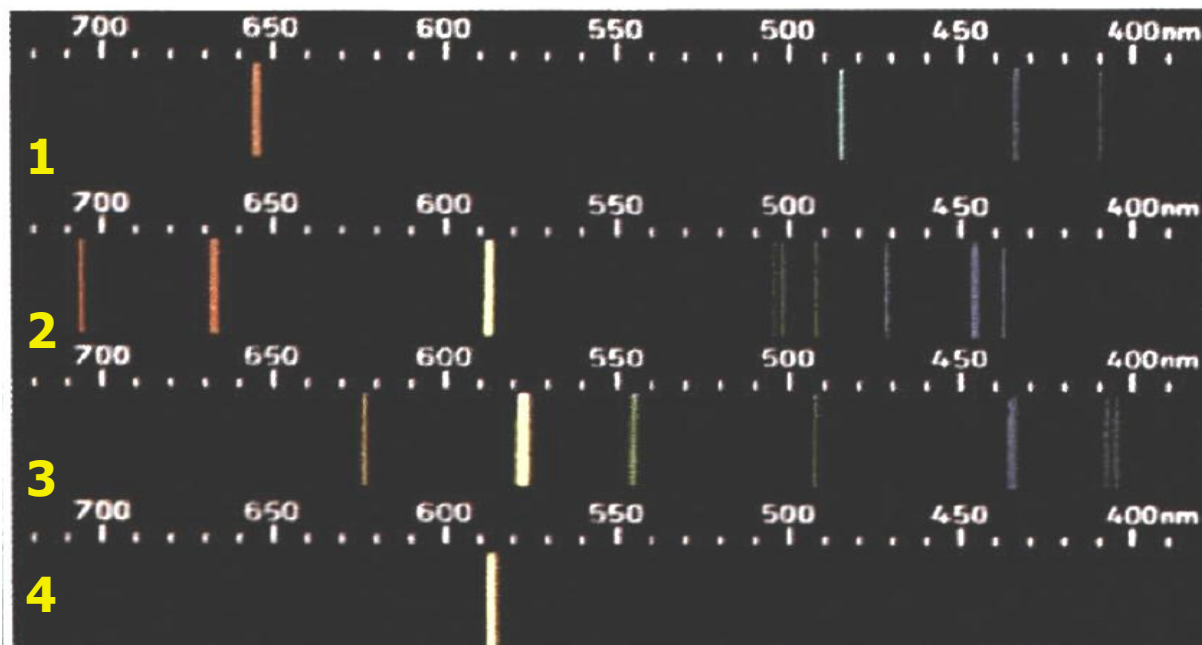
# 4 ΑΤΟΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

## Πείραμα του Rutherford

Σκέδαση σωματίων  $\alpha$  από ένα λεπτό φύλλο χρυσού. Το πείραμα αυτό έδειξε ότι το θετικό φορτίο και το μεγαλύτερο μέρος της μάζας ενός ατόμου είναι συγκεντρωμένα σε μια μικρή περιοχή του ατόμου, που ονομάστηκε πυρήνας.



## Φάσματα εκπομπής ατόμων





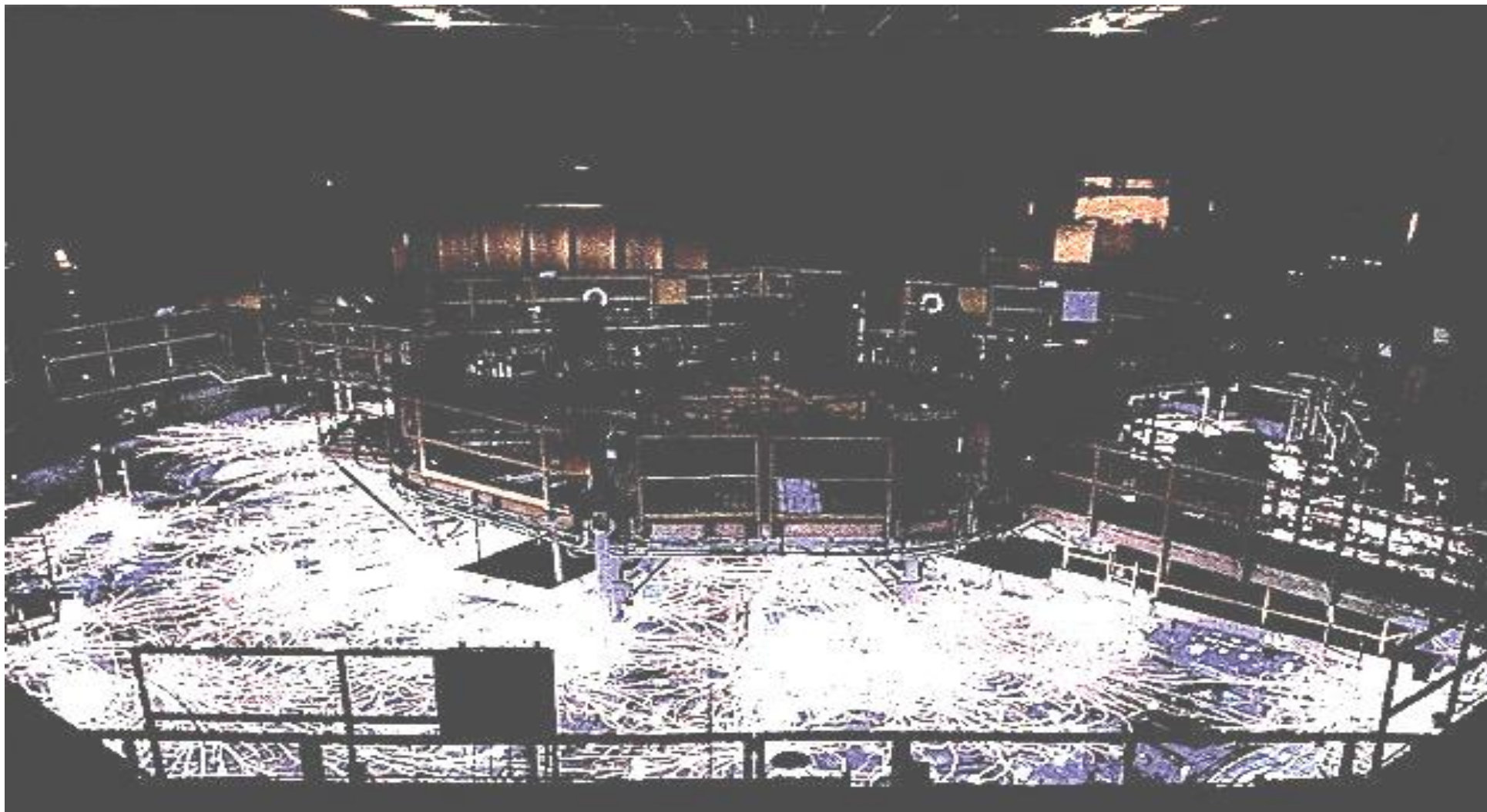
1. Υδρογόνου H
2. Ηλίου He
2. Υδραργύρου Hg
3. Νατρίου Na

**4.1 Ενέργεια του ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου**

**4.2 Διακριτές ενεργειακές στάθμες**

**4.3 Μηχανισμός παραγωγής και απορρόφησης φωτονίων**

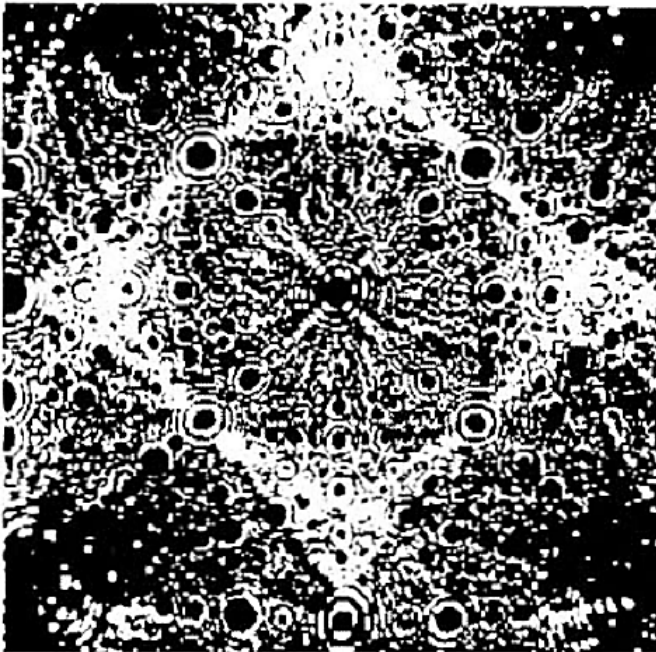
**4.4 Ακτίνες X**



Στο πυρηνικό εργοστάσιο Sandia στο Νέο Μεξικό ένας επιταχυντής φορτισμένων σωματιδίων (μηχανή Z) παράγει μέσα σε ελάχιστο χρόνο δέκα φορές περισσότερη ενέργεια από όλους μαζί τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής στον κόσμο. Η ενέργεια παράγεται υπό μορφή ακτινών X. Ηλεκτρικές εκκενώσεις φωτίζουν την επιφάνεια της μηχανής Z. Η παραγόμενη ισχύς είναι 210 τρισεκατομμύρια Watt.



4.1-1 Ένας φύλακας του ατομικού ρολογιού καισίου στο Γραφείο Μέτρων και Σταθμών της Ουάσιγκτον.



4.1-2 Άτομα στην επιφάνεια μιας μύτης βελόνας όπως φαίνονται με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο πεδίου.

## 4.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟΥ ΣΤΟ ΑΤΟΜΟ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Πρώτοι οι αρχαίοι Έλληνες φιλόσοφοι ασχολήθηκαν με το πρόβλημα των συστατικών της ύλης. Ο Λεύκιππος και ο Δημόκριτος υποστήριζαν ότι η ύλη αποτελείται από πολύ μικρά σωματίδια, τα οποία δεν μπορούν να διαιρούνται απεριόριστα και γι' αυτό ονομάστηκαν άτομα (δηλαδή άτμητα). Διατύπωσαν λοιπόν μια φιλοσοφική θεωρία, για να ερμηνεύσουν τις ιδιότητες των υλικών σωμάτων. Υποστήριξαν ότι η ύλη αποτελείται από άτομα που διαφέρουν μεταξύ τους



κατά το σχήμα και κατά το μέγεθος. Τα άτομα δε δημιουργούνται ούτε καταστρέφονται και επομένως είναι άφθαρτα και αιώνια. Τα άτομα είναι πάρα πολλά και βρίσκονται σε διαρκή κίνηση μέσα στο κενό. Τα διάφορα φυσικά φαινόμενα οφείλονται στην κίνηση των ατόμων. Ο σχηματισμός των υλικών σωμάτων οφείλεται στις ενώσεις των ατόμων με άλλα άτομα, ενώ αντίθετα η καταστροφή των σωμάτων οφείλεται στο διαχωρισμό των ατόμων.



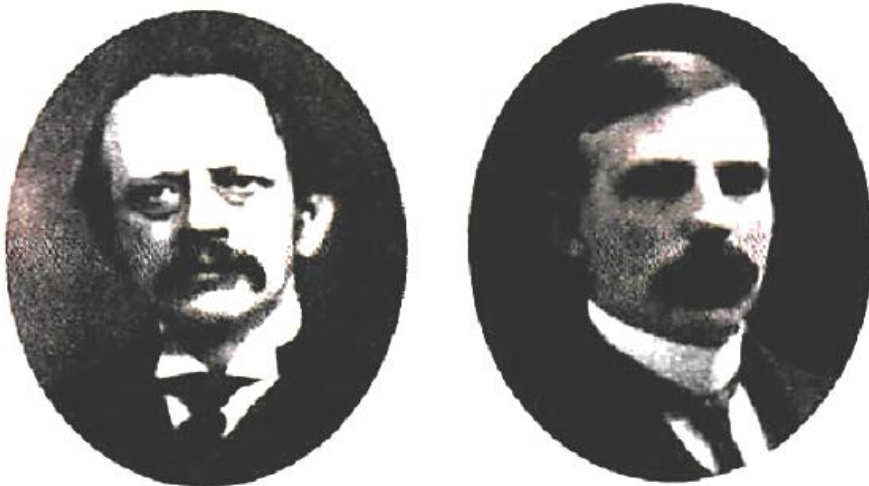
4.1-3 Δημόκριτος ο Αβδηρίτης (470-360 π.Χ.). Αρχαίος Έλληνας φιλόσοφος, ιδρυτής της ατομικής θεωρίας.

Ο Επίκουρος επηρεάστηκε από τη θεωρία του Δημόκριτου. Ένα μέρος της θεωρίας αυτής βρίσκεται σε ένα ποίημα του Ρωμαίου ποιητή Λουκρήτιου, όπου περιγράφεται, με βάση τις ατομικές αντιλήψεις του Δημόκριτου, η πίεση που ασκούν τα αέρια, η διάχυση των οσμών και το σχήμα των κρυστάλλων.

Η ατομική θεωρία του Δημόκριτου ήταν μία από τις φιλοσοφικές θεωρίες των αρχαίων Ελλήνων. Δεν υπήρχε καμία πειραματική παρατήρηση για την υποστήριξή της. Η θεωρία του Δημόκριτου καταπολεμήθηκε από τον Πλάτωνα, τον Αριστοτέλη και τους μαθητές τους και έπεσε σε αφάνεια μέχρι το 19ο

αιώνα. Στις αρχές του 19ου αιώνα ο Dalton (Ντάλτον) επανέφερε την ατομική θεωρία, για να εξηγήσει τους νόμους της Χημείας που ανακάλυψε πειραματικά.

Σημαντικό σταθμό στην εξέλιξη των επιστημονικών ιδεών για το άτομο αποτέλεσε η ανακάλυψη του ηλεκτρονίου από τον Thomson (Τόμσον) κατά το τέλος του 19ου αιώνα.



4.1-4 Αριστερά ο Άγγλος φυσικός J. J. Thomson (1856-1940) και δεξιά ο Ernest Rutherford (1871-1937).

Η ανακάλυψη του ηλεκτρονίου ως συστατικό του ατόμου έδειξε ότι το άτομο έχει εσωτερική δομή και επομένως δεν είναι άτμητο. Επειδή η ύλη είναι ηλεκτρικά ουδέτερη, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι και τα άτομα της ύλης είναι ηλεκτρικά ουδέτερα και επομένως το άτομο θα έχει ίσες ποσότητες θετικού και αρνητικού φορτίου.

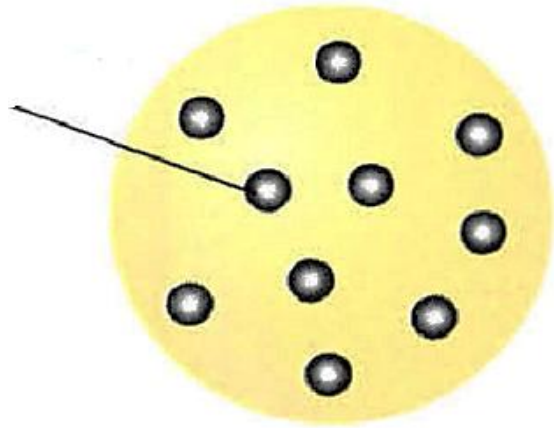
Επίσης τα πειράματα έδειξαν ότι η μάζα του τμήματος που είναι θετικά φορτισμένο είναι μεγαλύτερη από τη μάζα των ηλεκτρονίων του ατόμου.

Το ερώτημα που τέθηκε στη συνέχεια ήταν: « πώς η μάζα και το φορτίο κατανέμονται στο εσωτερικό του ατόμου;»

## Πρότυπο του Thomson

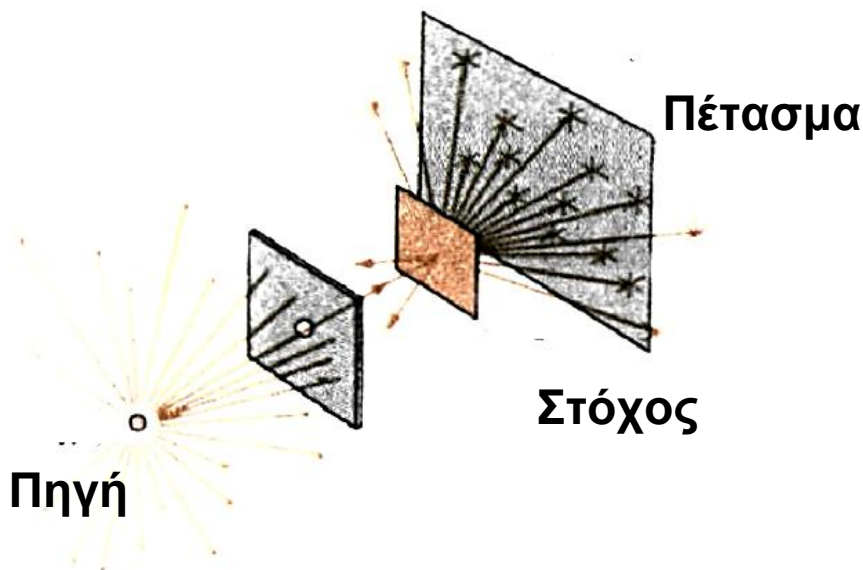
Ο Thomson (Τόμσον) πρότεινε ένα πρότυπο σύμφωνα με το οποίο το άτομο αποτελείται από μια σφαίρα θετικού φορτίου, ομοιόμορφα κατανεμημένου, μέσα στο οποίο είναι ενσωματωμένα τα ηλεκτρόνια, όπως οι σταφίδες μέσα σε ένα σφαιρικό σταφιδόψωμο.

Ηλεκτρόνιο



4.1-5 Το άτομο σύμφωνα με το πρότυπο του Thomson

## Πρότυπο του Rutherford



4.1-6 Πείραμα του Rutherford. Σκέδαση σωματίων  $\alpha$  από ένα λεπτό φύλλο χρυσού. Περίπου ένα στα 8000 σωματρία αποκλίνει κατά γωνία μεγαλύτερη των 90°. Τα σωματρία  $\alpha$  είναι πυρήνες ηλίου.

Ο Rutherford (Ράδερφορντ) και οι μαθητές του πραγματοποίησαν τα πρώτα πειράματα, για να



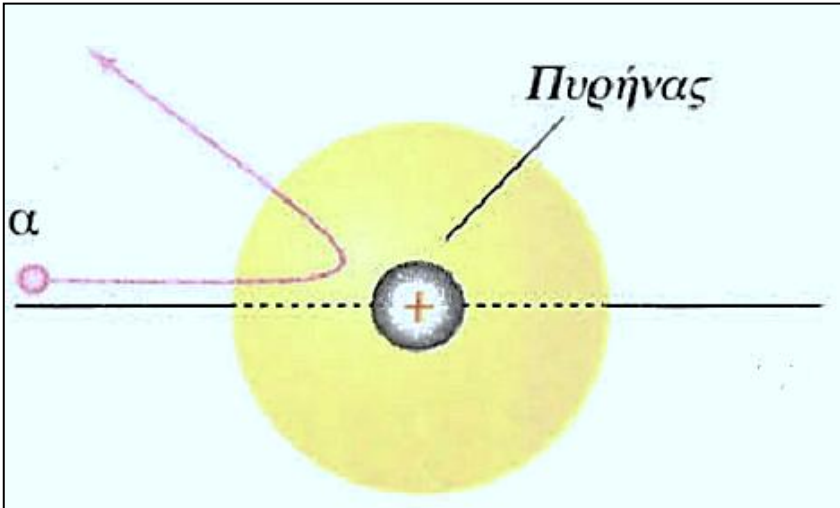
διερευνήσουν την εσωτερική δομή του ατόμου, τα αποτελέσματα των οποίων ήλθαν σε αντίθεση με το πρότυπο του Thomson. Στα πειράματα αυτά μια δέσμη θετικά φορτισμένων σωματίων α κατευθύνεται σε λεπτό μεταλλικό φύλλο χρυσού (στόχος). Σύμφωνα με το πρότυπο του Thomson, η δέσμη των σωματίων α δε θα πρέπει να αποκλίνει σημαντικά για τους εξής λόγους:

- α. Το ολικό ηλεκτρικό φορτίο του ατόμου είναι μηδέν και επομένως δεν ασκείται ηλεκτρική δύναμη στα σωματία α, όσο αυτά βρίσκονται στο εξωτερικό του ατόμου.
- β. Επειδή το θετικό ηλεκτρικό φορτίο είναι ομοιόμορφα κατανομημένο, δεν μπορεί να ασκεί σημαντική απωστική δύναμη στα σωματία α, όσο αυτά βρίσκονται στο εσωτερικό του ατόμου.
- γ. Η σύγκρουση των σωματίων α με το ηλεκτρόνια δεν επηρεάζει σημαντικά την κίνησή τους, γιατί τα ηλεκτρόνια έχουν πολύ μικρότερη μάζα. Με τον ίδιο τρόπο δεν επηρεάζεται σημαντικά η κίνηση μιας βαριάς πέτρας μέσα στη βροχή.

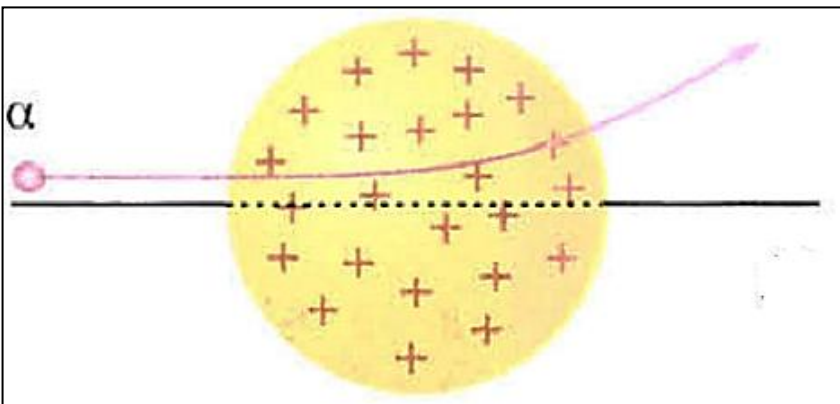
Ο Rutherford παρατήρησε ότι τα περισσότερα από τα σωματία α διέρχονται μέσα από το στόχο σχεδόν ανεπηρέαστα, σαν να κινούνται μέσα σε σχεδόν κενό χώρο. Αρκετά αποκλίνουν σε διάφορες γωνίες. Λίγα όμως αποκλίνουν κατά  $180^\circ$ . Αυτό μπορεί να συμβεί μόνο, αν το θετικό φορτίο είναι συγκεντρωμένο σε μικρό χώρο, ώστε να ασκεί στα σωματία α μεγάλες απωστικές ηλεκτρικές δυνάμεις.

4.1-7 (α) Τα σωματία α αποκλίνουν κατά μικρή γωνία σύμφωνα με το πρότυπο του Thomson.

(β) Τα σωμάτια α αποκλίνουν κατά μεγάλη γωνία



σύμφωνα με το πρότυπο του Rutherford

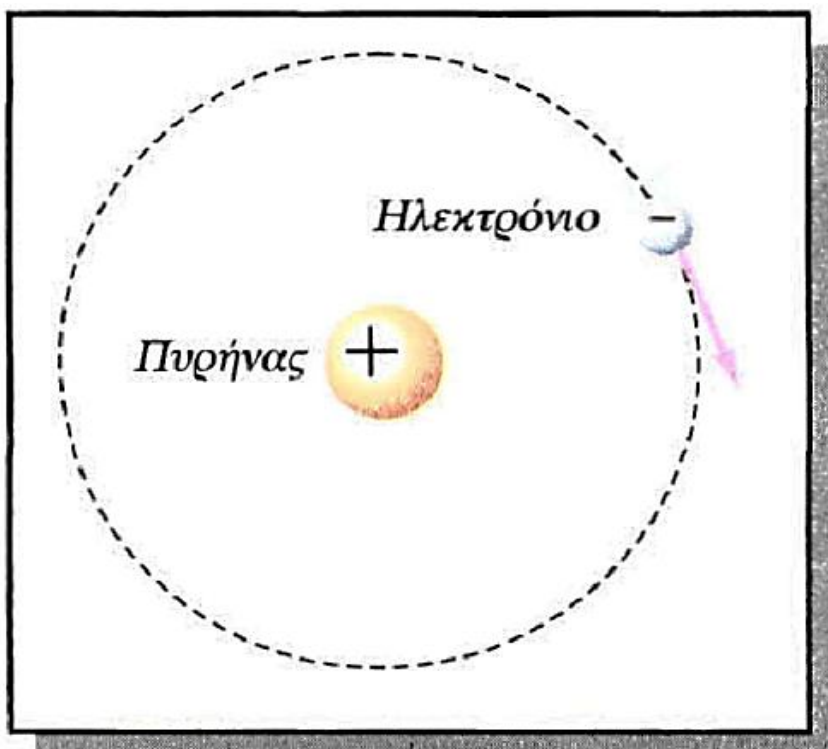


Για να ερμηνεύσει ο Rutherford τις πειραματικές παρατηρήσεις του, πρότεινε ένα πρότυπο σύμφωνα με το οποίο:

Το άτομο αποτελείται από μία πολύ μικρή περιοχή στην

οποία είναι συγκεντρωμένο όλο το θετικό φορτίο και σχεδόν όλη η μάζα του ατόμου. Η περιοχή αυτή ονομάζεται πυρήνας. Ο πυρήνας περιβάλλεται από ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια πρέπει να κινούνται γύρω από τον πυρήνα σε κυκλικές τροχιές, όπως οι πλανήτες γύρω από τον Ήλιο, γιατί, αν ήταν ακίνητα, θα έπεφταν πάνω στον πυρήνα εξαιτίας της ηλεκτρικής έλξης που δέχονται από αυτόν.

Το πρότυπο του Rutherford ονομάζεται και πλανητικό μοντέλο του ατόμου, γιατί αποτελεί μικρογραφία του ηλιακού πλανητικού συστήματος. Αποτελεί ένα μεγάλο βήμα, που πλησιάζει στην εικόνα του ατόμου όπως τη γνωρίζουμε σήμερα. Όμως το μοντέλο αυτό, όπως θα δούμε παρακάτω, παρουσιάζει ορισμένες σημαντικές αδυναμίες.



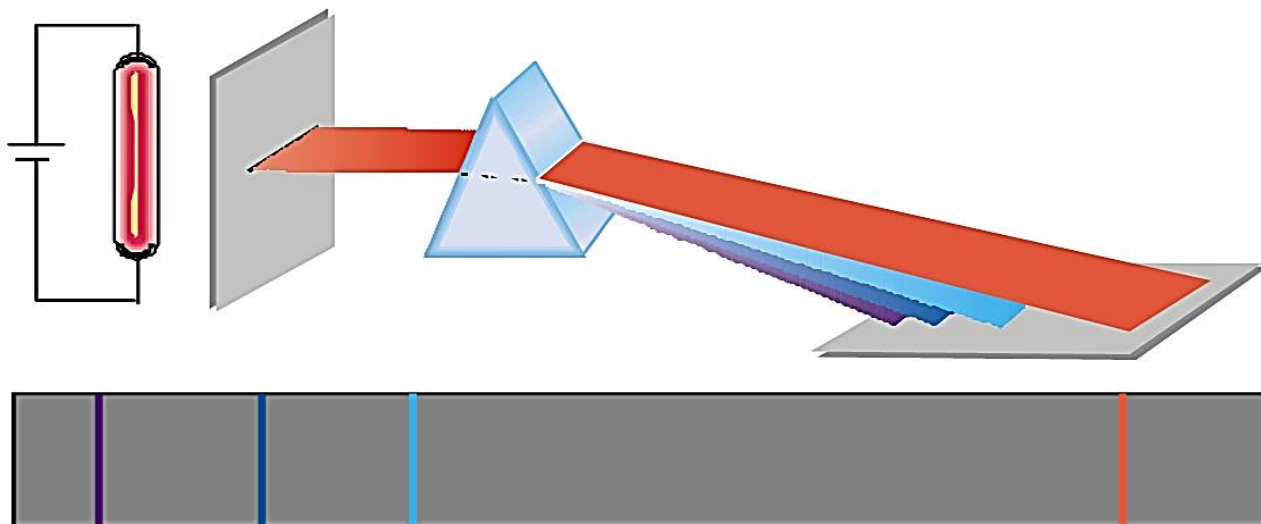
4.1-8 Μοντέλο του Rutherford για το άτομο (πλανητικό μοντέλο).

## Ατομικά φάσματα

Όταν εφαρμόσουμε ορισμένη τάση σε γυάλινο σωλήνα που περιέχει αέριο σε χαμηλή πίεση (όπως στις διαφημιστικές λυχνίες νέου), τότε θα παρατηρήσουμε ότι το αέριο εκπέμπει φως. Αν το φως αυτό αναλυθεί, όταν, για παράδειγμα, περάσει μέσα από ένα πρίσμα, τότε θα παρατηρήσουμε μια σειρά από φωτεινές γραμμές. Κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε ένα διαφορετικό μήκος κύματος ή χρώμα. Όπως γνωρίζουμε, η σειρά των γραμμών που παρατηρούνται ονομάζεται γραμμικό φάσμα εκπομπής του αερίου.

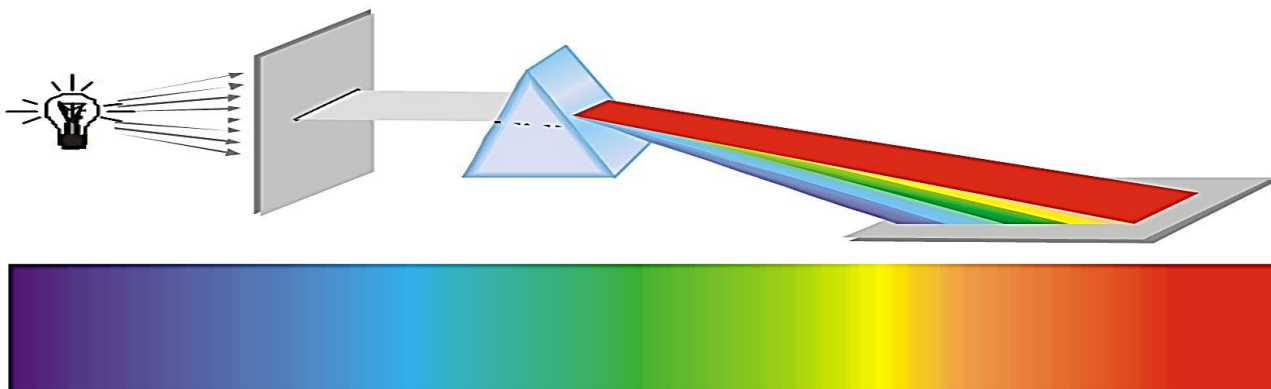
Τα μήκη κύματος που περιέχει το γραμμικό φάσμα εκπομπής είναι χαρακτηριστικά του στοιχείου που εκπέμπει το φως. Δεν υπάρχουν δύο διαφορετικά στοιχεία που να έχουν το ίδιο φάσμα εκπομπής. Το δεδομένο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των στοιχείων που περιέχονται σε μια

ουσία. Δηλαδή το γραμμικό φάσμα παίζει το ρόλο των δακτυλικών αποτυπωμάτων. Όπως από τα δακτυλικά αποτυπώματα μπορούμε να βρούμε τον άνθρωπο στον οποίο ανήκουν, έτσι και από το γραμμικό φάσμα μπορούμε να βρούμε το στοιχείο στο οποίο ανήκει.



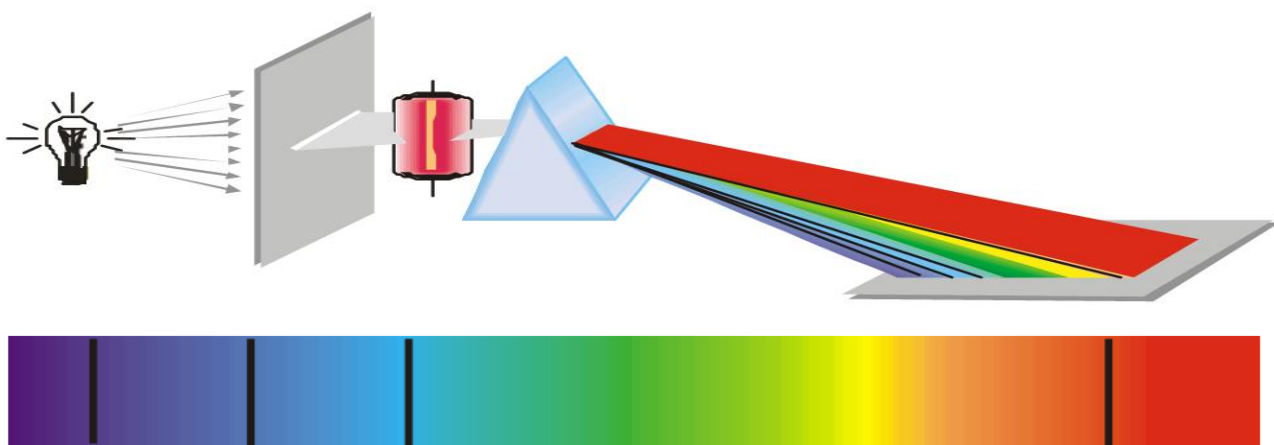
**4.1-9 Γραμμικό φάσμα εκπομπής τον υδρογόνου. Το φως που εκπέμπει το αέριο περνάει μέσα από ένα πρίσμα και το φάσμα αποτυπώνεται σε ευαίσθητο φιλμ.**

Ένα αέριο μπορεί όχι μόνο να εκπέμπει φως, αλλά μπορεί και να απορροφά φως. Αν φωτίσουμε με πηγή που εκπέμπει λευκό φως ένα πρίσμα, πίσω από το οποίο έχει τοποθετηθεί πέτασμα, τότε θα παρατηρήσουμε πάνω στο πέτασμα μια συνεχή χρωματιστή ταινία. Η ταινία αυτή των χρωμάτων, όπως γνωρίζουμε, ονομάζεται συνεχές φάσμα του λευκού φωτός.



**4.1-10 Συνεχές φάσμα του λευκού φωτός.**

Αν τώρα ανάμεσα στην πηγή του λευκού φωτός και στο πρίσμα τοποθετηθεί γυάλινο δοχείο που περιέχει κάποιο αέριο, τότε θα παρατηρήσουμε ότι η χρωματιστή ταινία διακόπτεται από σκοτεινές γραμμές. Η ταινία αυτή των χρωμάτων ονομάζεται **γραμμικό φάσμα** απορρόφησης του αερίου. Οι σκοτεινές γραμμές εμφανίζονται σε εκείνες ακριβώς τις συχνότητες στις οποίες εμφανίζονται οι φωτεινές γραμμές του φάσματος εκπομπής του ίδιου αερίου.



#### 4.1-11 Γραμμικό φάσμα απορρόφησης του υδρογόνου

Επομένως το πείραμα δείχνει ότι:

- α. Το φάσμα εκπομπής ή απορρόφησης ενός αερίου αποτελείται από ορισμένες φασματικές γραμμές που είναι χαρακτηριστικές του αερίου. Κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε ορισμένη συχνότητα (ή μήκος κύματος).
- β. Κάθε γραμμή του φάσματος απορρόφησης του αερίου συμπίπτει με μια γραμμή του φάσματος εκπομπής του. Δηλαδή κάθε αέριο απορροφά μόνο εκείνες τις ακτινοβολίες τις οποίες μπορεί να εκπέμπει.

Τα γραμμικά φάσματα των αερίων αποτέλεσαν το **κλειδί** για την έρευνα της δομής του ατόμου. Κάθε θεωρία για τη δομή του ατόμου πρέπει να εξηγεί γιατί τα άτομα εκπέμπουν ή απορροφούν μόνο ορισμένες

ακτινοβολίες και γιατί απορροφούν μόνο εκείνες τις ακτινοβολίες που μπορούν να εκπέμπουν.

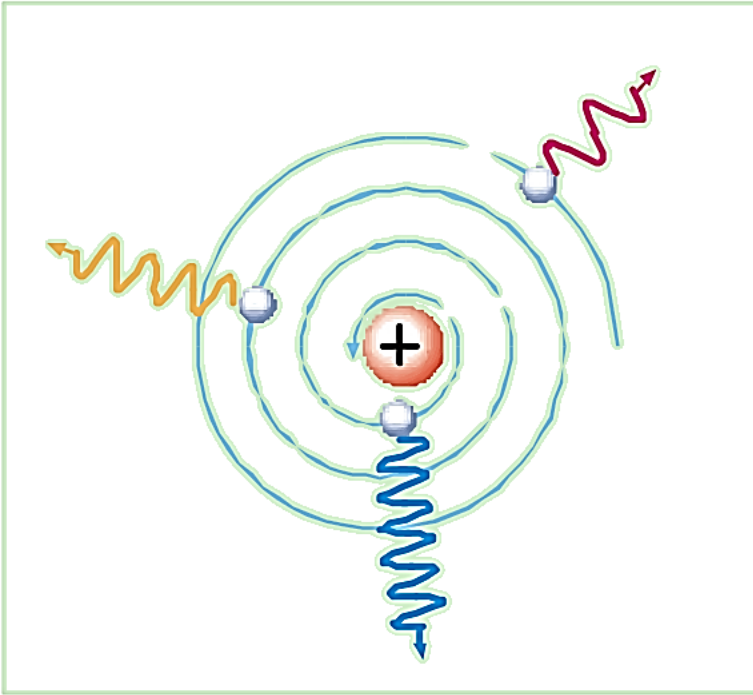
Το μοντέλο του Rutherford αδυνατούσε να εξηγήσει τα γραμμικά φάσματα των αερίων για τους εξής λόγους:

Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, το ηλεκτρόνιο περιφέρεται γύρω από τον πυρήνα σε κυκλική τροχιά. Το μέτρο της ταχύτητάς του είναι σταθερό, αλλά η κατεύθυνσή της συνεχώς μεταβάλλεται και επομένως το ηλεκτρόνιο έχει επιτάχυνση. Σύμφωνα με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία, το ηλεκτρόνιο, όπως και κάθε επιταχυνόμενο φορτίο, εκπέμπει ακτινοβολία, δηλαδή ακτινοβολεί ενέργεια. Η ενέργεια του ηλεκτρονίου θα πρέπει να μειώνεται συνεχώς. Επομένως θα πρέπει να κινείται σε σπειροειδή τροχιά με διαρκώς μειούμενη ακτίνα και με διαρκώς μεταβαλλόμενη συχνότητα, μέχρις ότου πέσει στον πυρήνα.

Η συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας θα πρέπει να είναι ίση με τη συχνότητα περιφοράς του ηλεκτρονίου, η οποία μεταβάλλεται συνεχώς.

Άρα, σύμφωνα με το μοντέλο του Rutherford, τα άτομα θα έπρεπε να εκπέμπουν συνεχές φάσμα και όχι γραμμικό, όπως παρατηρείται στην πράξη.





**4.1-12 Ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο του ατόμου.** Σύμφωνα με την κλασική Φυσική, το επιταχυνόμενο ηλεκτρόνιο έπρεπε να εκπέμπει συνεχές φάσμα και ακολουθώντας σπειροειδή τροχιά να πέφτει στον πυρήνα.

Για να ερμηνεύσει τα γραμμικά φάσματα του υδρογόνου, ο Bohr πρότεινε ένα νέο πρότυπο για το άτομο του υδρογόνου.

### **Το πρότυπο του Bohr για το υδρογόνο**

Στις αρχές του 20ού αιώνα οι επιστήμονες διαπίστωσαν ότι η κλασική Φυσική αδυνατούσε να ερμηνεύσει τα γραμμικά φάσματα των αερίων. Δεν μπορούσε να εξηγήσει:

- Γιατί το υδρογόνο εκπέμπει μόνο ορισμένα μήκη κύματος ακτινοβολίας;
- Γιατί απορροφά μόνο τα μήκη κύματος που εκπέμπει;



4.1-13 Ο Δανός φυσικός Niels Bohr (1885-1962). Τιμήθηκε με το βραβείο Nobel Φυσικής το 1922 για την έρευνά του στη δομή των ατόμων.

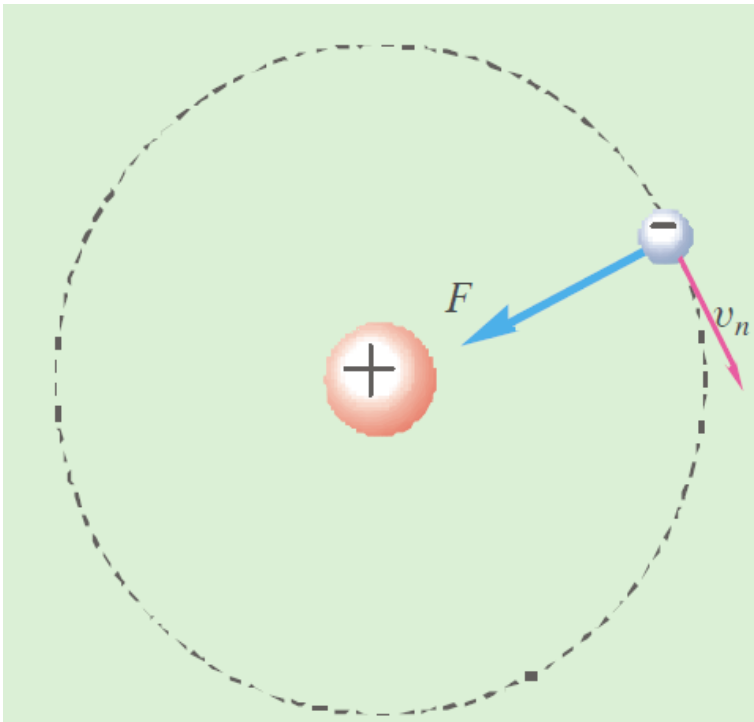
Για να απαντήσει στα παραπάνω ερωτήματα, ο Δανός φυσικός Bohr (Μπορ) πρότεινε ένα πρότυπο για το άτομο του υδρογόνου, που στηρίζεται στις παρακάτω παραδοχές:

- α. Το ηλεκτρόνιο του ατόμου του υδρογόνου περιφέρεται γύρω από το θετικά φορτισμένο πυρήνα με την επίδραση της δύναμης Coulomb που δέχεται από αυτόν (σχήμα 2-14).
- β. Το ηλεκτρόνιο μπορεί να κινείται μόνο σε ορισμένες τροχιές, οι οποίες ονομάζονται επιτρεπόμενες τροχιές. Οι επιτρεπόμενες τροχιές είναι εκείνες για τις οποίες ισχύει ότι η στροφορμή του ηλεκτρονίου είναι κβαντωμένη και ίση με ακέραιο πολλαπλάσιο της ποσότητας  $\hbar = h/2\pi$ , όπου  $h$  είναι η σταθερά του Plank. Το μέτρο της στροφορμής του ηλεκτρονίου δίνεται από την εξίσωση:

$$L = m v r$$

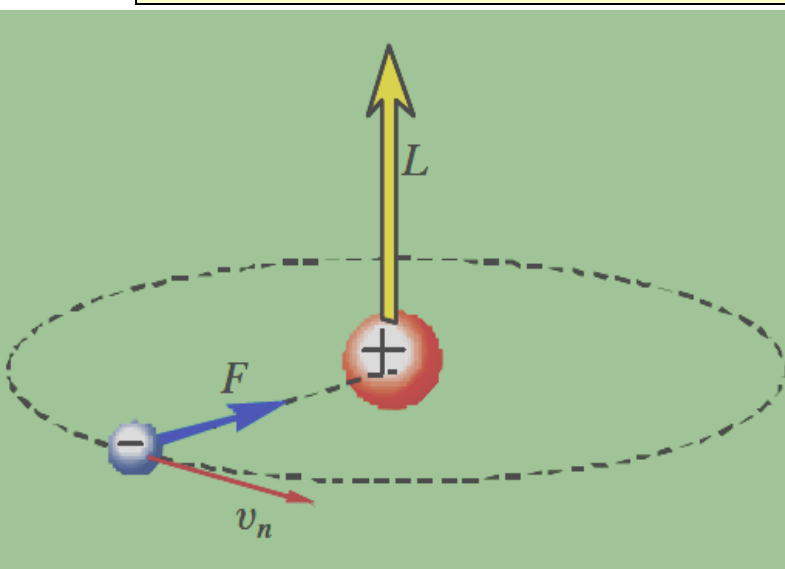
όπου  $m$  είναι η μάζα του ηλεκτρονίου,  $v$  είναι το μέτρο της ταχύτητάς του και  $r$  η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς του. Εφαρμόζοντας τη συνθήκη σύμφωνα με την οποία η στροφορμή του ηλεκτρονίου είναι κβαντωμένη, έχουμε:

$$m v r = n \frac{h}{2\pi} = n \hbar, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \infty \quad (4.1)$$



4.1-14 Το πρωτόνιο θεωρείται ακίνητο. Η δύναμη Coulomb  $F$  προκαλεί την απαιτούμενη κεντρομόλο επιτάχυνση. Το ηλεκτρόνιο λοιπόν περιφέρεται με ταχύτητα  $v_n$  σε επιτρεπόμενη τροχιά ακτίνας  $r_n$ , ώστε να ισχύει:

$$m v r = n \hbar$$



4.1-14α Το διάνυσμα της στροφορμής  $L$  του ηλεκτρονίου στο πρότυπο του Bohr.

γ. Όταν το ηλεκτρόνιο κινείται σε ορισμένη επιτρεπόμενη τροχιά, δεν εκπέμπει ακτινοβολία. Η παραδοχή αυτή έρχεται σε αντίθεση με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία σύμφωνα με την οποία το ηλεκτρόνιο θα έπρεπε να ακτινοβολεί συνεχώς

ενέργεια, να διαγράψει σπειροειδή τροχιά με διαρκώς μειούμενη ακτίνα και τελικά να πέφτει στον πυρήνα.

δ. Όταν το ηλεκτρόνιο μεταπηδήσει από μία επιτρεπόμενη τροχιά σε άλλη μικρότερης ενέργειας, τότε εκπέμπεται ένα φωτόνιο με ενέργεια ίση με τη διαφορά μεταξύ της αρχικής και της τελικής του ενέργειας. Αν  $E_{\alpha}$  είναι η ενέργεια του ατόμου πριν από τη μετάβαση,  $E_{\tau}$  η ενέργεια μετά τη μετάβαση και  $h f$  η ενέργεια του εκπεμπόμενου φωτονίου, τότε ισχύει:

$$E_{\tau} - E_{\alpha} = h f \quad (4.2)$$

### Ολική ενέργεια ηλεκτρονίου

Θα υπολογίσουμε την κινητική, τη δυναμική και την ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου, θεωρούμε ότι το ηλεκτρόνιο περιφέρεται γύρω από τον ακίνητο πυρήνα, ο οποίος αποτελείται από ένα πρωτόνιο. Σύμφωνα με το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, η ηλεκτρική ελκτική δύναμη  $F = k e^2 / r^2$ , που ασκεί ο πυρήνας στο ηλεκτρόνιο, πρέπει να είναι ίση με  $F = m a_{\kappa}$ , όπου  $a_{\kappa} = v^2 / r$  είναι η κεντρομόλος επιτάχυνση του ηλεκτρονίου:

$$F = m a_{\kappa} \quad \text{ή} \quad k \frac{e^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \quad \text{ή} \quad v = \sqrt{\frac{k e^2}{m r}}$$

Αντικαθιστώντας την παραπάνω σχέση στην εξίσωση  $K = \frac{1}{2} m v^2$  βρίσκουμε:

$$K = k \frac{e^2}{2r}$$

Η δυναμική ενέργεια του ηλεκτρονίου δίνεται από την εξίσωση:

$$U = -k \frac{e^2}{r}$$

Η ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι το άθροισμα της κινητικής και της δυναμικής του ενέργειας:

$$E = K + U = k \frac{e^2}{2r} + \left(-k \frac{e^2}{r}\right) \quad \text{ή}$$

$$E = -k \frac{e^2}{2r} \quad \text{Ολική ενέργεια ηλεκτρονίου} \quad (4.3)$$

Όταν αναφερόμαστε στην ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου, εννοούμε την ενέργεια του συστήματος που αποτελείται από το ηλεκτρόνιο και τον ακίνητο πυρήνα του ατόμου. Η ενέργεια αυτή οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ του ηλεκτρονίου και του πυρήνα.

### Επιτρεπόμενες τροχιές και τιμές ενέργειας

Η μικρότερη ακτίνα επιτρεπόμενης τροχιάς του ηλεκτρονίου ονομάζεται ακτίνα του Bohr και είναι ίση με  $r_1 = 0,53 \times 10^{-10} \text{ m}$ . Οι ακτίνες των άλλων επιτρεπόμενων τροχιών του ηλεκτρονίου δίνονται από την εξίσωση:

$$r_n = n^2 r_1 \quad \text{Επιτρεπόμενες τροχιές} \quad (4.4)$$

όπου  $n$  είναι ακέραιος θετικός αριθμός, ο οποίος ονομάζεται κύριος κβαντικός αριθμός, και μπορεί να πάρει τιμές από ένα μέχρι άπειρο:

$$n = 1, 2, 3, \dots, \infty$$

### Το ηλεκτρονιοβόλτ (eV)

Το ηλεκτρονιοβόλτ είναι η ενέργεια που μεταβιβάζεται σε ένα ηλεκτρόνιο, όταν αυτό επιταχύνεται μέσω διαφοράς δυναμικού 1V.

$$1\text{eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Όταν το ηλεκτρόνιο κινείται στην τροχιά με τη μικρότερη ακτίνα ( $n = 1$ ), τότε έχει την ελάχιστη ενέργεια, που είναι ίση με  $E_1 = -13,6\text{eV}$ . Όταν κινείται στις άλλες επιτρεπόμενες τροχιές, τότε έχει ολική ενέργεια που δίνεται από την εξίσωση:

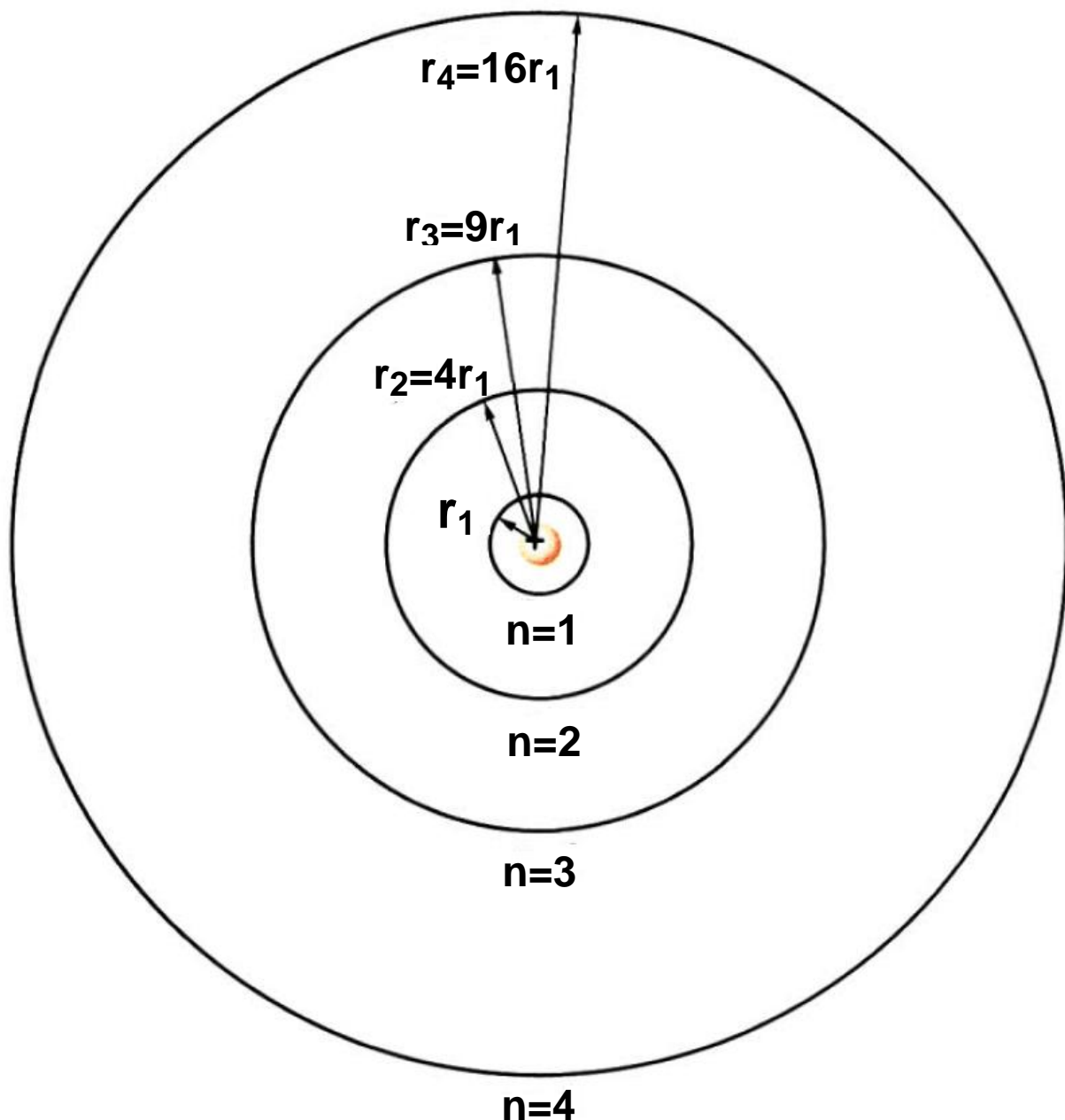
$$E_n = \frac{E_1}{n^2} \quad \text{Επιτρεπόμενες τιμές ενέργειας (4.5)}$$

Γνωρίζοντας τις τιμές των  $r_1$  και  $E_1$  και αντικαθιστώντας  $n = 1, 2, 3, \dots$  στις εξισώσεις 2.4 και 2.5, υπολογίζουμε τις επιτρεπόμενες τιμές της ακτίνας και της ενέργειας. Οι τιμές αυτές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Κύριος κβαντικός αριθμός	$n=1$	$n=2$	$n=3$	...	$n \rightarrow \infty$
Ακτίνα	$r_1$	$4r_1$	$9r_1$	...	$\infty$
Ολική ενέργεια	$E_1$	$E_1/4$	$E_1/9$	...	$0$

Οι τιμές της ενέργειας είναι αρνητικές. Η μεγαλύτερη τιμή της ενέργειας είναι  $E = 0$ . Αντιστοιχεί σε  $n \rightarrow \infty$  και  $r \rightarrow \infty$  και περιγράφει την κατάσταση κατά την οποία το ηλεκτρόνιο έχει απομακρυνθεί από το άτομο (ιονισμός). Η φυσική σημασία τον αρνητικού προσήμου της ολικής ενέργειας είναι ότι απαιτείται προσφορά ενέργειας, για να απομακρυνθεί το ηλεκτρόνιο σε περιοχή εκτός του ηλεκτρικού πεδίου τον πυρήνα.





**4.1-15** Επιτρεπόμενες τροχιές τον ηλεκτρονίου στο πρότυπο τον Bohr για το άτομο τον υδρογόνου.

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4 – 1

Ένα άτομο υδρογόνου που βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση έχει ολική ενέργεια  $E_1 = -13,6\text{eV}$ . Η ακτίνα της τροχιάς του ηλεκτρονίου είναι  $r_1 = 0,53 \times 10^{-10}\text{ m}$ . Να υπολογιστούν οι ακτίνες της τροχιάς και οι ενέργειες του ηλεκτρονίου στις δύο πρώτες διεγερμένες

καταστάσεις, που αντιστοιχούν σε κβαντικούς αριθμούς  $n = 2$  και  $n = 3$ .

**ΛΥΣΗ** Η ακτίνα της τροχιάς δίνεται από την εξίσωση:

$$r_n = n^2 \cdot r_1$$

Αντικαθιστώντας  $n = 2$  και  $n = 3$ , βρίσκουμε:

$$r_2 = 2^2 r_1 = 4r_1 = 2,12 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$r_3 = 3^2 r_1 = 9r_1 = 4,77 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

Η ολική ενέργεια του ατόμου του υδρογόνου δίνεται από την εξίσωση:

$$E_n = \frac{E_1}{n^2}$$

Αντικαθιστώντας  $n = 2$  και  $n = 3$ , βρίσκουμε:

$$E_2 = \frac{E_1}{2^2} = \frac{E_1}{4} = \frac{13,6 \text{ eV}}{4} = -3,4 \text{ eV}$$

$$E_3 = \frac{E_1}{3^2} = \frac{E_1}{9} = \frac{13,6 \text{ eV}}{9} = -1,51 \text{ eV}$$

### Απόδειξη των τύπων (2.4) και (2.5)

Χρησιμοποιούμε την εξίσωση που περιγράφει την κβάντωση της στροφορμής:  $m u r = n \hbar$  (1) και το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα για το ηλεκτρόνιο του ατόμου του υδρογόνου:

$$F = m a_k \quad \text{ή} \quad k \frac{e^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \quad \text{ή} \quad m u^2 r = k e^2 \quad (2)$$

Λύνουμε την (1) ως προς  $u$  και αντικαθιστούμε το αποτέλεσμα στη (2):

$$m \frac{n^2 \hbar^2}{m^2 r^2} r = k e^2 \quad \text{ή} \quad r = n^2 \frac{\hbar^2}{m k e^2}$$

Αντικαθιστώντας το  $r$  με  $r_n$ , έχουμε:

$$r_n = n^2 \frac{h^2}{mke^2} \quad n = 1, 2, 3, \dots, \infty$$

Ακτίνες επιτρεπόμενων τροχιών (4.6)

Αντικαθιστώντας  $n = 1$ , βρίσκουμε την τροχιά με τη μικρότερη ακτίνα  $r_1$ :

$$r_1 = \frac{h^2}{mke^2}$$

Αντικαθιστώντας την τελευταία εξίσωση στη 2.6, παίρνουμε:

$$r_n = n^2 r_1$$

Αν αντικαταστήσουμε στην εξίσωση 2.3 το  $E$  με  $E_n$  και το  $r$  με  $r_n$ , παίρνουμε την ακόλουθη έκφραση για την ενέργεια του ατόμου:

$$E = -k \frac{e^2}{2r} \quad \text{ή} \quad E_n = -k \frac{e^2}{2r_n} \quad \text{ή λόγω της 4.6}$$

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{mk^2 e^4}{2h^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \infty$$

Επιτρεπόμενες τιμές της ενέργειας (4.7)

Η μικρότερη τιμή της ενέργειας αντιστοιχεί σε  $n = 1$ . Αντικαθιστώντας  $n = 1$  στην εξίσωση 4.7, βρίσκουμε:

$$E_1 = \frac{mk^2 e^4}{2h^2} \quad \text{και} \quad E_n = \frac{E_1}{n^2}$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των σταθερών  $m$ ,  $k$ ,  $e$  και  $\hbar = h/2\pi$  υπολογίζουμε τη μικρότερη επιτρεπόμενη ακτίνα  $r_1$  και τη μικρότερη επιτρεπόμενη ενέργεια  $E_1$ . Είναι:

$$r_1 = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ m} \quad \text{και} \quad E_1 = -13,6 \text{ eV}$$

Η έννοια της κβάντωσης της ενέργειας είναι σημαντική, γιατί εξηγεί ότι το ηλεκτρόνιο κινείται μόνο σε ορισμένες τροχιές καθορισμένης ενέργειας και δεν

κινείται σπειροειδώς πλησιάζοντας συνεχώς προς τον πυρήνα. Επίσης η κβάντωση της ενέργειας έδωσε ώθηση στην ανάπτυξη της κβαντομηχανικής. Όμως η κβάντωση της στροφορμής, σύμφωνα με το πρότυπο του Bohr, έχει ιστορική μόνο σημασία.

## 4.2 ΔΙΑΚΡΙΤΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΣΤΑΘΜΕΣ

### Ενεργειακές στάθμες

Οι επιτρεπόμενες τιμές της ενέργειας του υδρογόνου και κάθε ατόμου ονομάζονται **ενεργειακές στάθμες**. Οι αντίστοιχες καταστάσεις του ατόμου ονομάζονται **ενεργειακές καταστάσεις**. Η κατάσταση με τη χαμηλότερη ενέργεια  $E_1$  ονομάζεται **θεμελιώδης κατάσταση**. Όλες οι άλλες ενεργειακές καταστάσεις  $E_2, E_3, \dots$  ονομάζονται **διεγερμένες καταστάσεις**.

### Διάγραμμα ενεργειακών σταθμών

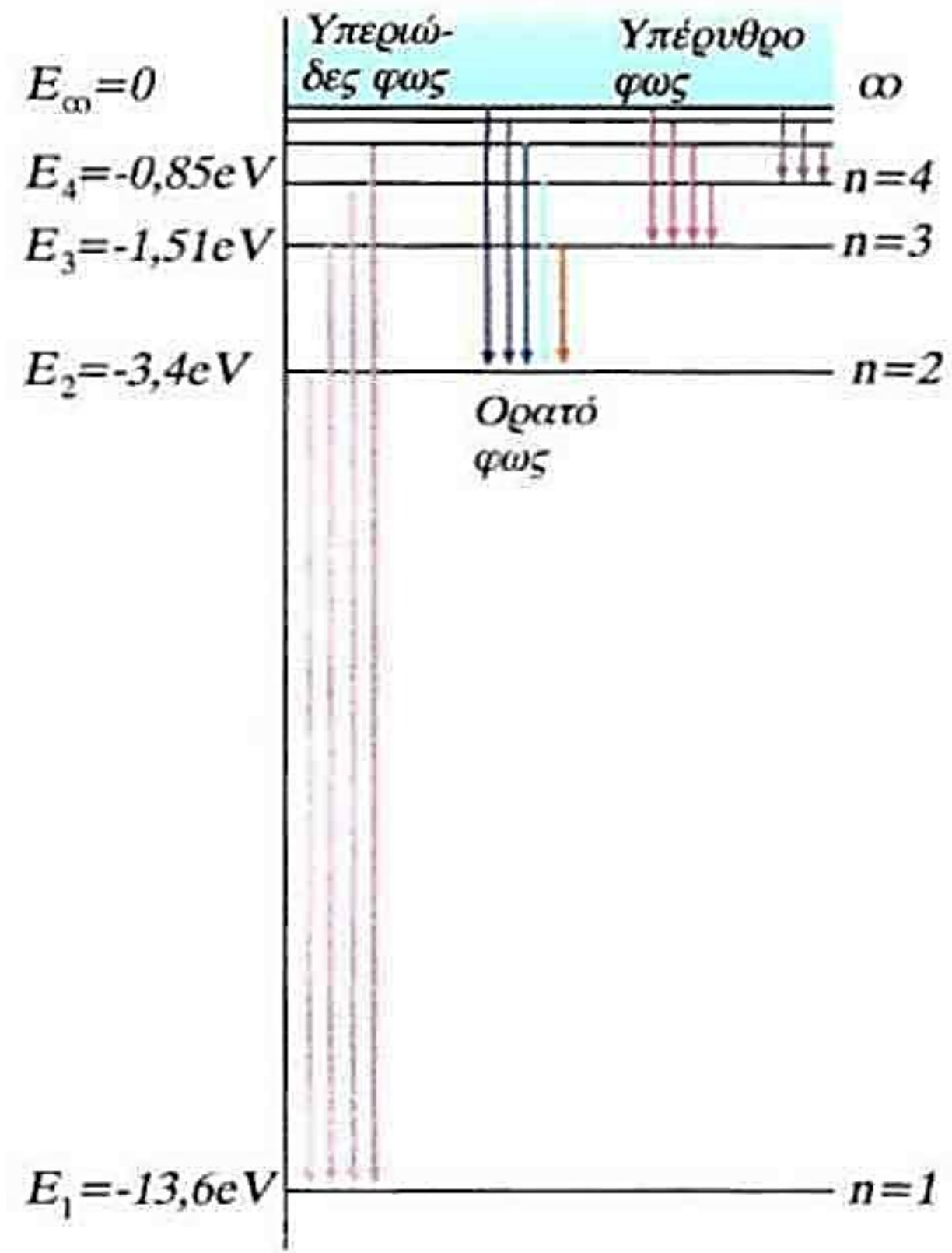
Παίρνουμε κατακόρυφο άξονα βαθμολογημένο σε τιμές ενέργειας και σχεδιάζουμε οριζόντιες ευθείες γραμμές στις θέσεις που αντιστοιχούν στις επιτρεπόμενες τιμές ενέργειας  $E_1, E_2, E_3, \dots$  του ηλεκτρονίου. Το σχήμα που προκύπτει είναι το **διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών**.

Η απόσταση μεταξύ δύο ενεργειακών σταθμών αντιστοιχεί στη διαφορά των αντίστοιχων ολικών ενεργειών του ηλεκτρονίου. Η μετάβαση του ηλεκτρονίου από μία τροχιά σε άλλη συμβολίζεται με κατακόρυφο βέλος, που έχει αρχή την αρχική στάθμη και τέλος την τελική στάθμη.

## **Διέγερση του ατόμου**

Αν το άτομο του υδρογόνου που βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση απορροφήσει ενέργεια, τότε το ηλεκτρόνιο μπορεί να μεταπηδήσει σε άλλη επιτρεπόμενη τροχιά υψηλότερης ενέργειας.

Η μετάβαση ενός ηλεκτρονίου του ατόμου από μία τροχιά χαμηλής ενέργειας σε άλλη υψηλότερης ενέργειας ονομάζεται **διέγερση του ατόμου**. Η ενέργεια που απαιτείται για τη διέγερση του ατόμου ονομάζεται **ενέργεια διέγερσης**.



**4.1-16** Διάγραμμα ενεργειακών σταθμών τον ατόμου του υδρογόνου. Οι μεταβάσεις των ηλεκτρονίων από μία τροχιά σε άλλη συμβολίζονται με κατακόρυφα βέλη.



Το διεγερμένο άτομο παραμένει στην κατάσταση διέγερσης για ελάχιστο χρονικό διάστημα (της τάξης του  $10^{-8}$  s) και επανέρχεται στη θεμελιώδη κατάσταση. Η επάνοδος του ηλεκτρονίου στη θεμελιώδη κατάσταση μπορεί να γίνει είτε απευθείας με ένα άλμα, οπότε εκπέμπεται ένα φωτόνιο, είτε με περισσότερα διαδοχικά άλματα, οπότε εκπέμπονται τόσα φωτόνια όσα και τα άλματα που πραγματοποιοιεί.

### Ιονισμός του ατόμου

Μερικές φορές το άτομο μπορεί να απορροφήσει τόσο μεγάλη ενέργεια, ώστε είναι δυνατό το ηλεκτρόνιο του να απομακρυνθεί από τον πυρήνα, σε περιοχή που ο πυρήνας δεν ασκεί ηλεκτρική δύναμη στο ηλεκτρόνιο. Το ηλεκτρόνιο απομακρύνεται οριστικά από τον πυρήνα και το άτομο μετατρέπεται σε θετικό ιόν. Η απομάκρυνση ενός ηλεκτρονίου του ατόμου σε περιοχή εκτός του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα ονομάζεται **ιονισμός του ατόμου**. Η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται, για να απομακρυνθεί το ηλεκτρόνιο του ατόμου από τη θεμελιώδη τροχιά σε περιοχή εκτός του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα, ονομάζεται **ενέργεια ιονισμού**.

$$E_{\text{ιον.}} = E_{\infty} - E_1$$

όπου  $E_{\infty}$  είναι η ενέργεια του ατόμου που αντιστοιχεί σε κατάσταση με  $n \rightarrow \infty$  και  $E_1$  η ενέργειά του στη θεμελιώδη κατάσταση. Επομένως:

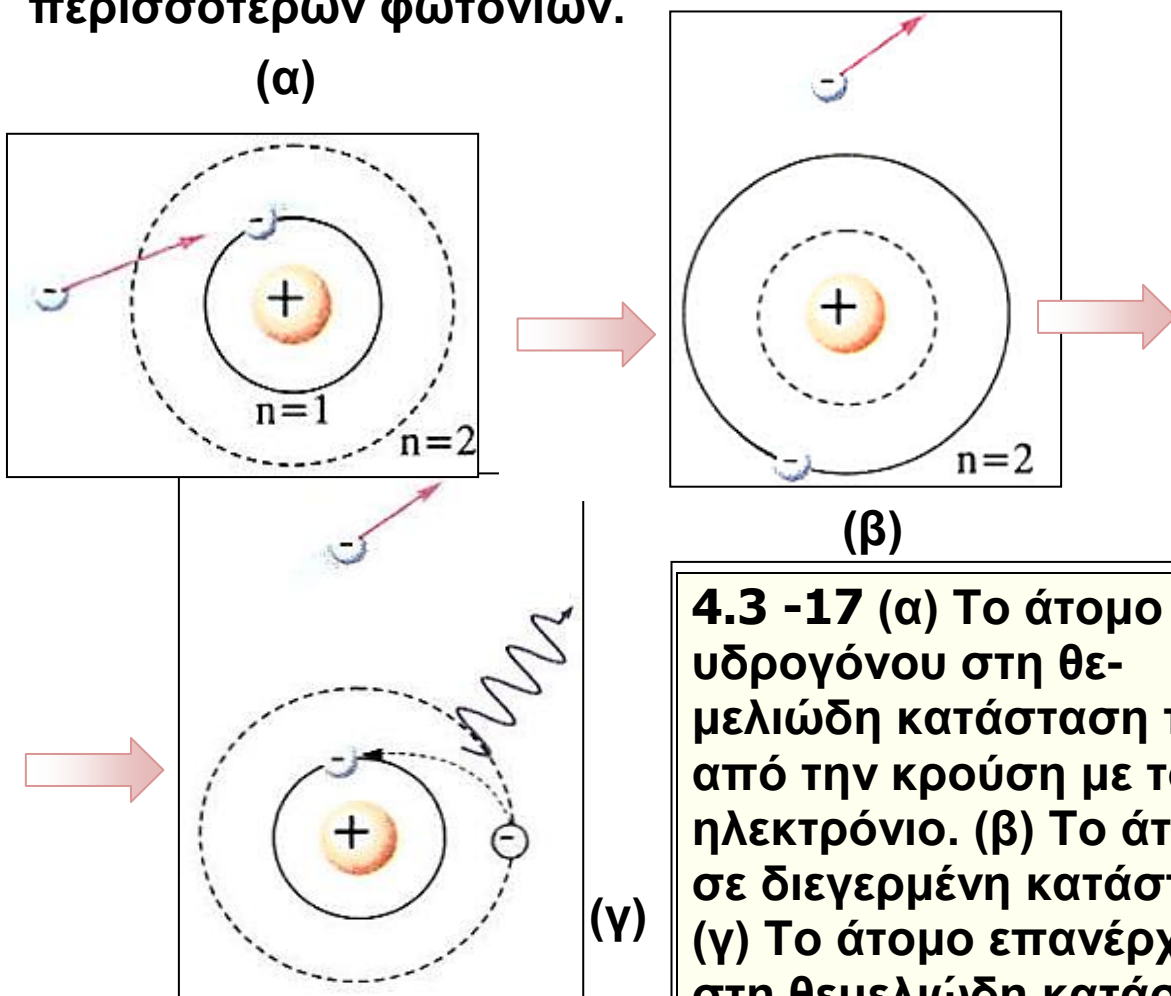
$$E_{\text{ιον.}} = - E_1$$

Για το άτομο του υδρογόνου είναι  $E_1 = -13,6\text{eV}$ , οπότε η ενέργεια ιονισμού είναι  $E_{\text{ιον.}} = 13,6\text{eV}$ .

## 4.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΦΩΤΟΝΙΩΝ

### Διέγερση με κρούση

Όταν ένα σωματίδιο (π.χ. ηλεκτρόνιο, ιόν ή άτομο) συγκρουστεί με ένα άτομο υδρογόνου, που βρίσκεται, λόγω χάρη, στη θεμελιώδη κατάσταση, τότε το ηλεκτρόνιο του ατόμου μπορεί να απορροφήσει ικανή ποσότητα ενέργειας και να μεταπηδήσει σε τροχιά μεγαλύτερης ενέργειας, με αποτέλεσμα το άτομο να διεγερθεί. Το διεγερμένο άτομο επανέρχεται μετά από ελάχιστο χρόνο στη θεμελιώδη κατάσταση. Η επάνοδος μπορεί να γίνει είτε με ένα άλμα κατευθείαν στη θεμελιώδη κατάσταση, με ταυτόχρονη εκπομπή ενός φωτονίου, είτε με περισσότερα ενδιάμεσα άλματα από τροχιά σε τροχιά, με ταυτόχρονη εκπομπή περισσότερων φωτονίων.

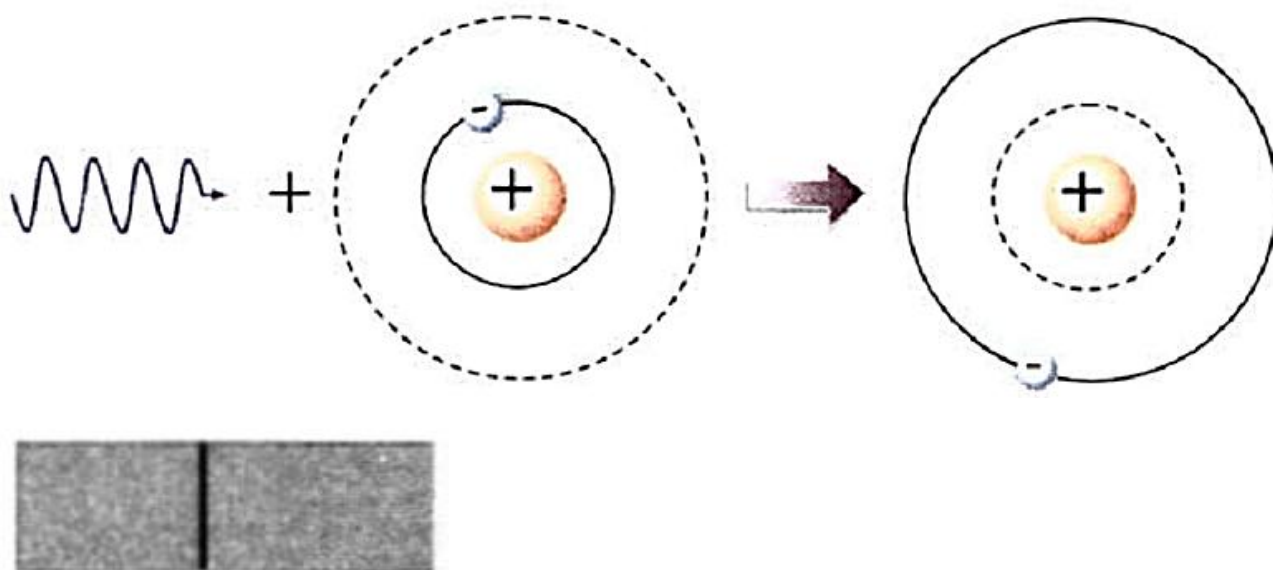


**4.3 -17** (α) Το άτομο του υδρογόνου στη θεμελιώδη κατάσταση πριν από την κρούση με το ηλεκτρόνιο. (β) Το άτομο σε διεγερμένη κατάσταση. (γ) Το άτομο επανέρχεται στη θεμελιώδη κατάσταση εκπέμποντας ένα φωτόνιο.

Για παράδειγμα, το ηλεκτρικό πεδίο σε σωλήνα που περιέχει αέριο χαμηλής πίεσης επιταχύνει τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα που ήδη βρίσκονται μέσα στο σωλήνα. Όταν η ενέργειά τους γίνει αρκετά μεγάλη, τότε είναι δυνατό να προκαλέσουν διέγερση των ατόμων ή των ιόντων του αερίου με τα οποία συγκρούονται.

### Διέγερση με απορρόφηση ακτινοβολίας

Ας θεωρήσουμε ότι ένα άτομο υδρογόνου βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση ( $n = 1$ ) και απορροφά ένα φωτόνιο, που έχει τόση ενέργεια όση ακριβώς απαιτείται, για να μεταπηδήσει το ηλεκτρόνιο από τη θεμελιώδη κατάσταση στην κατάσταση που αντιστοιχεί σε κβαντικό αριθμό  $n=2$ .

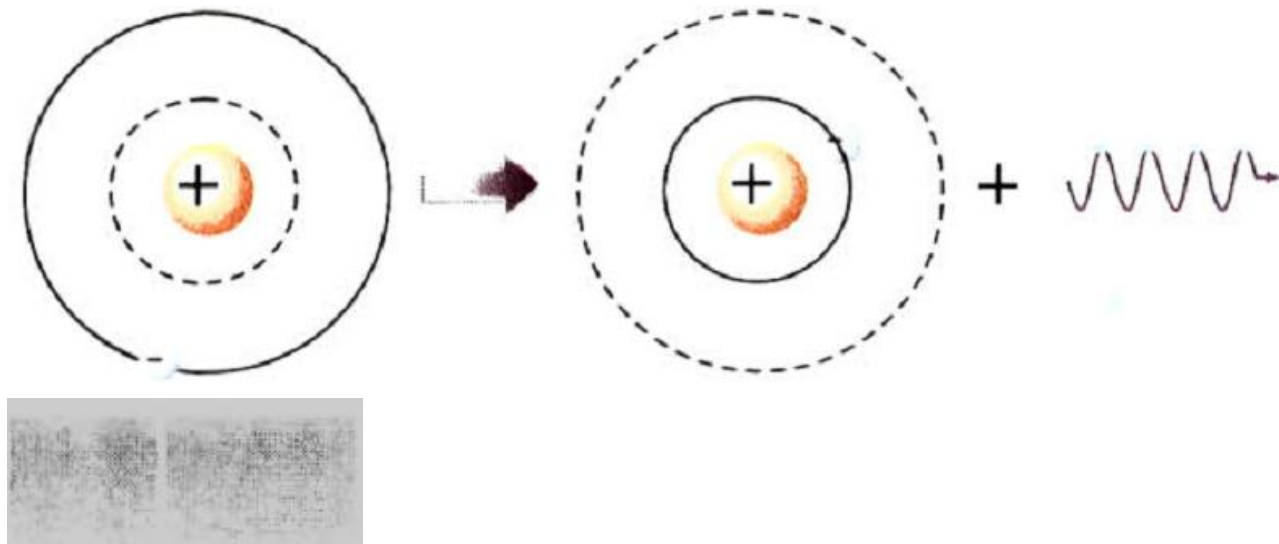


**4.3 -18** Ερμηνεία του φάσματος απορρόφησης. Το άτομο απορροφά ένα φωτόνιο και μεταβαίνει από τη θεμελιώδη κατάσταση στην πρώτη διεγερμένη κατάσταση. Η σκοτεινή γραμμή του φάσματος απορρόφησης αντιστοιχεί στο μήκος κύματος του φωτονίου που απορροφήθηκε.

Μετά από ελάχιστο χρονικό διάστημα το διεγερμένο άτομο επανέρχεται στην κατάσταση  $n = 1$  εκπέμποντας

ένα φωτόνιο, που έχει μήκος κύματος ίσο με το μήκος κύματος του φωτονίου που απορρόφησε (σχήμα 2-19).

Επομένως και οι ενέργειες των δύο φωτονίων είναι ίσες. Αυτός είναι ο λόγος που το φάσμα εκπομπής παρουσιάζει μία φωτεινή γραμμή στη θέση της σκοτεινής γραμμής του φάσματος απορρόφησης.



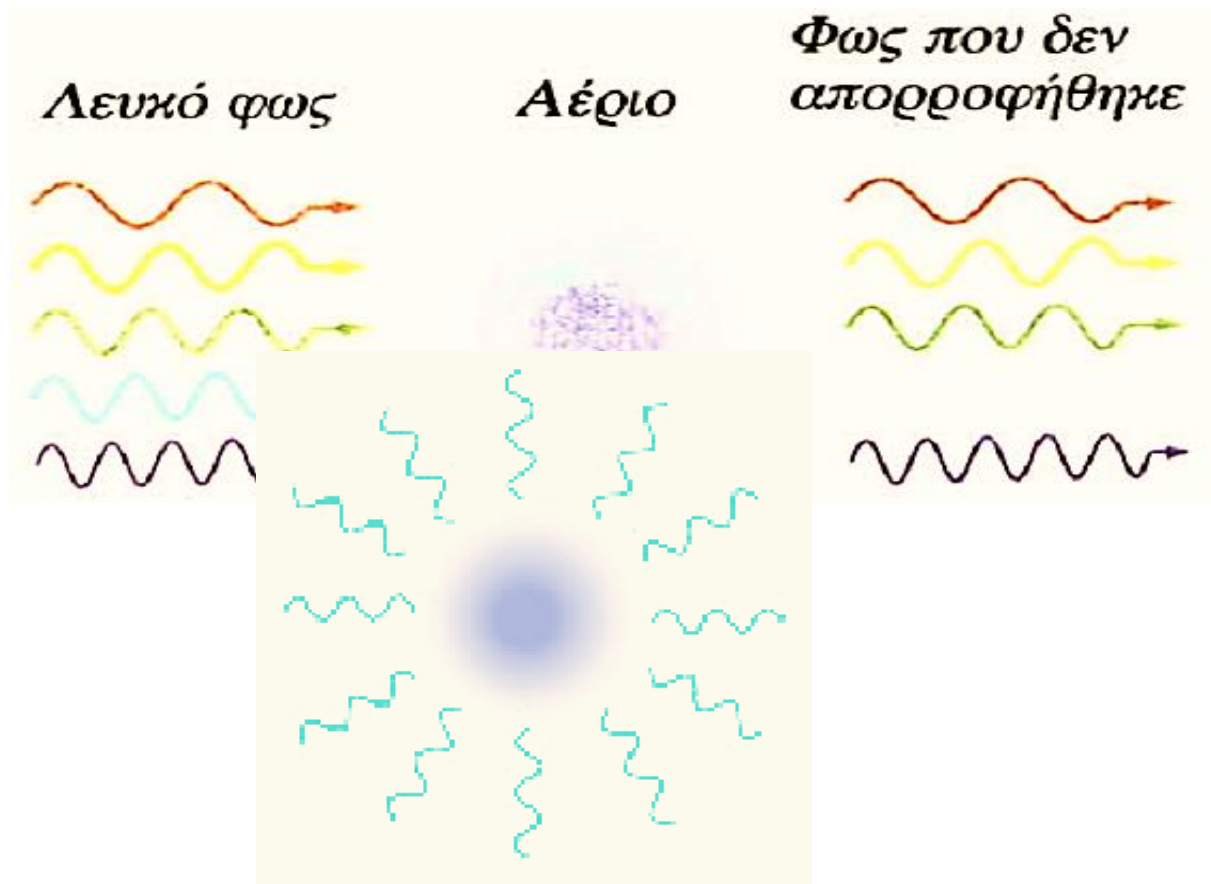
**4.3 -19** Ερμηνεία του φάσματος εκπομπής. Το άτομο εκπέμπει ένα φωτόνιο και μεταβαίνει στη θεμελιώδη κατάσταση. Η φωτεινή γραμμή αντιστοιχεί στο μήκος κύματος του φωτονίου που εκπέμπεται.

Όταν λευκό φως, το οποίο, όπως γνωρίζουμε, περιέχει όλα τα μήκη κύματος, διέρχεται μέσα από αέριο υδρογόνο, τότε το αέριο απορροφά μόνο εκείνα τα φωτόνια τα οποία έχουν μήκη κύματος που αντιστοιχούν σε μεταβάσεις μεταξύ των επιτρεπόμενων τιμών ενέργειας του ατόμου του υδρογόνου. Τα διεγερμένα άτομα του υδρογόνου επανέρχονται στη θεμελιώδη κατάσταση εκπέμποντας φωτόνια προς όλες τις κατευθύνσεις.

**Συμπέρασμα :**

Το αέριο απορροφά και εκπέμπει φωτόνια που έχουν ορισμένα μήκη κύματος. Τα μήκη κύματος των φωτονίων που απορροφά το αέριο είναι ίσα με τα μήκη κύματος των φωτονίων που εκπέμπει. Το φάσμα απορρόφησης

του αερίου παρουσιάζει σκοτεινές γραμμές στη θέση των φωτεινών γραμμών του φάσματος εκπομπής.



**4.3 -20** Το φως που απορροφήθηκε από το αέριο επανεκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις.

### Η επιτυχία και η αποτυχία του προτύπου του Bohr

Σύμφωνα με το πρότυπο του Bohr, όταν το ηλεκτρόνιο του ατόμου του υδρογόνου μεταβεί από αρχική τροχιά, που αντιστοιχεί σε κβαντικό αριθμό  $n_\alpha$ , σε τελική τροχιά μικρότερης ενέργειας, που αντιστοιχεί σε κβαντικό αριθμό  $n_\tau$ , τότε εκπέμπεται ένα φωτόνιο συχνότητας  $f$ , για την οποία ισχύει:

$$E_\alpha - E_\tau = hf \quad \text{ή} \quad f = \frac{E_\alpha - E_\tau}{h} \quad (2.8)$$

Το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου φωτονίου υπολογίζεται από την εξίσωση:  $c = \lambda f$ .

Οι τιμές του μήκους κύματος που υπολογίζονται από την παραπάνω εξίσωση συμφωνούν με τις πειραματικές τιμές. Δηλαδή το πρότυπο του Bohr περιγράφει τα γραμμικά φάσματα του υδρογόνου.

Το πρότυπο του Bohr μπορεί να επεκταθεί και σε ιόντα που έχουν μόνο ένα ηλεκτρόνιο, όπως το  $(\text{He}^+)$ , το  $(\text{Li}^{2+})$  κ.λπ. τα οποία ονομάζονται υδρογονοειδή.

Το πρότυπο του Bohr δεν μπορεί να ερμηνεύσει τα γραμμικά φάσματα των ατόμων που έχουν δύο ή περισσότερα ηλεκτρόνια.

Κατά το 1920 αναπτύχθηκε μια νέα θεωρία, η κβαντομηχανική, η οποία περιγράφει με επιτυχία τα φαινόμενα που αναφέρονται στα σωματίδια του μικρόκοσμου και στο φως.

#### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4 - 2

Να υπολογιστεί το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπει το άτομο του υδρογόνου, όταν μεταπηδά από την κατάσταση με  $n = 6$  στην κατάσταση με  $n = 2$ . Η ενέργεια του ατόμου του υδρογόνου στη θεμελιώδη κατάσταση είναι

$$E_1 = -13,6\text{eV} \quad (h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}, \quad c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}).$$

**ΛΥΣΗ** Το μήκος κύματος του φωτονίου που εκπέμπει το άτομο προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$E_6 - E_2 = hf. \quad \text{Αντικαθιστώντας } f = \frac{c}{\lambda} \text{ βρίσκουμε:}$$

$$E_6 - E_2 = h \frac{c}{\lambda} \quad \text{ή} \quad \lambda = \frac{hc}{E_6 - E_2} \quad (1)$$

Οι ενέργειες  $E_2$  και  $E_6$  υπολογίζονται από τις εξισώσεις:

$$E_2 = \frac{E_1}{n^2} = \frac{E_1}{2^2} = -3,4\text{eV} = -3,4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$



$$E_6 = \frac{E_1}{n^2} = \frac{E_1}{6^2} = -\frac{13,6}{36} \text{ eV} = -0,378 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Αντικαθιστώντας στην (1) τις παραπάνω τιμές, βρίσκουμε:

$$\lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{(-0,378 + 3,4) \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ m} = 4,1 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4 – 3

Ένα άτομο υδρογόνου, που βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση έχει ολική ενέργεια  $E_1 = -13,6\text{eV}$ :

(α) Να υπολογιστεί το μήκος κύματος ενός φωτονίου που θα προκαλέσει ιονισμό του ατόμου.

(β) Να υπολογιστεί η ελάχιστη ταχύτητα ενός ηλεκτρονίου που θα προκαλέσει, λόγω κρούσης, ιονισμό του ατόμου.

**ΛΥΣΗ** (α) Η ενέργεια που απαιτείται, για να απομακρυνθεί το ηλεκτρόνιο του ατόμου από τη θεμελιώδη κατάσταση στην κατάσταση  $n \rightarrow \infty$ , είναι:

$$E = E_\infty - E_1$$

Αντικαθιστώντας  $E_\infty = 0$  και  $E_1 = -13,6\text{eV}$ , βρίσκουμε:

$$E = 13,6\text{eV}$$

Η ενέργεια  $E$  που απαιτείται, για να ιονιστεί το άτομο, είναι ίση με την ενέργεια  $hf$  του φωτονίου, που προκαλεί τον ιονισμό. Άρα:  $E=hf$ .

Αντικαθιστώντας  $f = c/\lambda$ , βρίσκουμε:  $E = h \frac{c}{\lambda}$ , οπότε

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{(6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(3 \cdot 10^8 \text{ m/s})}{13,6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}} = 0,91 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

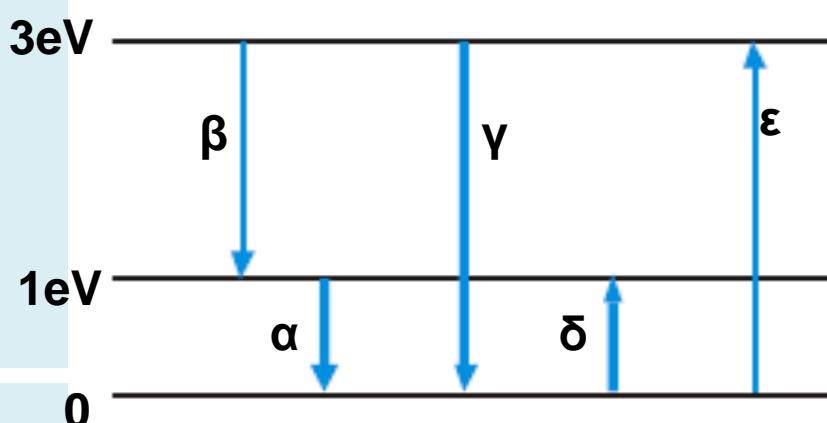
(β) Η ενέργεια που απαιτείται, για να ιονιστεί το άτομο, είναι ίση με την κινητική ενέργεια  $\frac{1}{2}mv^2$  του ηλεκτρονίου:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \text{ ή } u = \sqrt{\frac{2E}{m}} \text{ ή } u = \sqrt{\frac{2 \cdot 13,6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ Kg}}} = 2,19 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

#### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4 – 4

Ένα υποθετικό άτομο έχει τρεις ενεργειακές στάθμες, τη θεμελιώδη και δύο άλλες διεγερμένες στάθμες με ενέργεια 1eV και 3eV, αντίστοιχα, περισσότερη από τη θεμελιώδη: (α) Να υπολογιστούν οι συχνότητες και τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας που μπορεί να εκπέμπει το άτομο. (β) Ποια μήκη κύματος της ακτινοβολίας μπορεί να απορροφήσει το άτομο, αν βρίσκεται αρχικά στη θεμελιώδη κατάσταση; ( $h = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$ ,  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ .)

**ΛΥΣΗ** (α) Στο σχήμα φαίνεται το διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών του ατόμου.



Οι δυνατές ενέργειες των εκπεμπόμενων φωτονίων αντιστοιχούν στις μεταβάσεις α, β και γ. Χρησιμοποιούμε την εξίσωση  $E = hf$  για καθεμιά από τις μεταβάσεις.

$$\text{Μετάβαση } \alpha : f_{\alpha} = \frac{E}{h} = \frac{1\text{eV}-0}{4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}} = 2,42 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\text{Μετάβαση } \beta : f_{\beta} = \frac{E}{h} = \frac{(3-1)\text{eV}}{4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}} = 4,84 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\text{Μετάβαση } \gamma : f_{\gamma} = \frac{E}{h} = \frac{3\text{eV}-0}{4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}} = 7,26 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Τα αντίστοιχα μήκη κύματος της ακτινοβολίας είναι:

$$\lambda_{\alpha} = \frac{c}{f_{\alpha}} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2,42 \cdot 10^{14} \text{ Hz}} = 1,24 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 1240 \text{ nm}$$

$$\lambda_{\beta} = \frac{c}{f_{\beta}} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{4,84 \cdot 10^{14} \text{ Hz}} = 6,20 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 620 \text{ nm}$$

$$\lambda_{\gamma} = \frac{c}{f_{\gamma}} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{7,25 \cdot 10^{14} \text{ Hz}} = 4,14 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 414 \text{ nm}$$

(β) Από το διάγραμμα προκύπτει ότι, όταν το άτομο βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση, μπορεί να απορροφήσει μόνο φωτόνια με ενέργεια 1eV ή 3eV (μετάβαση δ και ε αντίστοιχα).

Δεν μπορεί να απορροφήσει φωτόνια ενέργειας 2eV, αφού δεν υπάρχει ενεργειακή στάθμη με ενέργεια 2eV υψηλότερη από τη θεμελιώδη. Από τους υπολογισμούς που έχουν γίνει παρατηρούμε ότι τα αντίστοιχα μήκη κύματος θα είναι 1240nm και 414nm.

## 4.4 ΑΚΤΙΝΕΣ Χ

Σε πολλές περιπτώσεις ένας γιατρός, προκειμένου να κάνει διάγνωση μιας πάθησης, παραπέμπει τον ασθενή του στον ακτινολόγο, για να βγάλει μια ακτινογραφία. Όσοι έχουμε βγάλει ακτινογραφία θώρακα γνωρίζουμε ότι κατά τη λήψη της ακτινογραφίας στεκόμαστε ακίνητοι, χωρίς να

αναπνέουμε, ενώ ο ακτινολόγος βγαίνει έξω από το χώρο λήψης της ακτινογραφίας. Αν στη συνέχεια παρατηρήσουμε προσεκτικά την ακτινογραφία, θα δούμε ότι τα οστά του θώρακα εμφανίζονται ως φωτεινές περιοχές, ενώ οι ιστοί ως σκοτεινές περιοχές.

Κατά τη λήψη της ακτινογραφίας μια άορατη ακτινοβολία διαπερνά το σώμα μας. Όμως τι είναι αυτή η ακτινοβολία και πώς παράγεται;

Προς το τέλος του 19ου αιώνα ο Γερμανός φυσικός Roentgen (Ρέντγκεν) μελετούσε τις ιδιότητες των ηλεκτρονίων που επιταχύνονταν, μέσα σε σωλήνα χαμηλής πίεσης, από ηλεκτρικό πεδίο και έπεφταν σε μεταλλικό στόχο. Ο Roentgen παρατήρησε ότι, όταν πλησίαζε στο σωλήνα μία φθορίζουσα ουσία, τότε η ουσία, ακτινοβολούσε φως, ενώ, όταν πλησίαζε ένα φωτογραφικό φιλμ, τότε αυτό μαύριζε. Υποστήριξε λοιπόν ότι τα φαινόμενα αυτά οφείλονταν σε ένα νέο άγνωστο και μυστηριώδη τύπο ακτινών, τις οποίες ονόμασε ακτίνες X. Το σύμβολο X χρησιμοποιήθηκε από το Roentgen για να δηλώσει την άγνωστη μέχρι τότε φύση των ακτινών, όπως στην Άλγεβρα το σύμβολο X χρησιμοποιείται για να συμβολίσει μία άγνωστη ποσότητα. Οι ακτίνες X ονομάζονται και ακτίνες Roentgen.



**4.4 -21 Wilhelm Roentgen (1845-1923).** Ανακάλυψε το 1895 τις ακτίνες X. Το 1901 τιμήθηκε με το βραβείο Nobel.

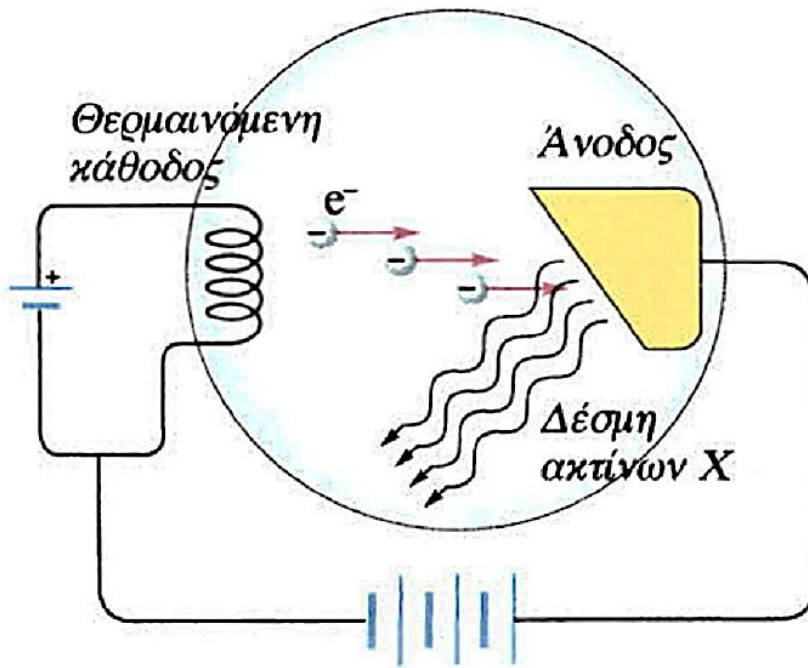
### Παραγωγή ακτινών X

συσσκευή που



H

χρησιμοποιήθηκε από το Roentgen αποτελείται από ένα γυάλινο σωλήνα που είναι εφοδιασμένος με δύο ηλεκτρόδια, την άνοδο και την κάθοδο. Η κάθοδος θερμαίνεται και εκπέμπει ηλεκτρόνια. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία της καθόδου τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται στη μονάδα του χρόνου.



4.4 -22 Συσκευή παραγωγής ακτίνων X. Ηλεκτρόνια μεγάλης ταχύτητας προσπίπτουν σε μεταλλικό στόχο. Από το μεταλλικό στόχο εκπέμπονται ακτίνες X

Μεταξύ της ανόδου και της καθόδου εφαρμόζεται υψηλή τάση, η οποία επιταχύνει τα ηλεκτρόνια. Ο σωλήνας περιέχει αέριο σε πολύ χαμηλή πίεση (της τάξης των  $10^{-7}$  atm), ώστε να περιορίζονται οι συγκρούσεις των ηλεκτρονίων με τα μόρια του αερίου. Τα ηλεκτρόνια προσπίπτουν στην άνοδο με μεγάλη ταχύτητα.

Η άνοδος εκπέμπει μια πολύ δεισδυτική ακτινοβολία, που ονομάζεται ακτίνες X. Επειδή αναπτύσσεται πολύ υψηλή θερμοκρασία στην άνοδο, το υλικό της ανόδου είναι δύστηκτο μέταλλο και ψύχεται για να μη λιώνει. Επομένως:

**Οι ακτίνες X παράγονται, όταν ηλεκτρόνια μεγάλης ταχύτητας, που έχουν επιταχυνθεί από υψηλή τάση, προσπίπτουν σε μεταλλικό στόχο.**

### **Φύση των ακτίνων X**

Τα πειράματα έχουν δείξει ότι οι ακτίνες X είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (φωτόνια), που έχει πολύ μικρό μήκος κύματος. Το μήκος κύματος είναι 10000 φορές μικρότερο από το μήκος κύματος του ορατού φωτός και είναι συγκρίσιμο με το μέγεθος του ατόμου.

Επομένως:

**Οι ακτίνες X είναι άορατη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, που έχει μήκη κύματος πολύ μικρότερα από τα μήκη κύματος των ορατών ακτινοβολιών.**

### **Φάσμα των ακτινών X**

Το φάσμα της ακτινοβολίας X είναι σύνθετο. Αποτελείται από ένα συνεχές φάσμα πάνω στο οποίο εμφανίζονται μερικές γραμμές (γραμμικό φάσμα). Τα δύο είδη φάσματος οφείλονται σε δύο διαφορετικές διεργασίες παραγωγής και εκπομπής των ακτινών X.

#### **α. Γραμμικό φάσμα**

Τα κινούμενα ηλεκτρόνια συγκρούονται με τα άτομα του υλικού της ανόδου. Τα άτομα της ανόδου διεγείρονται. Ένα ηλεκτρόνιο των εσωτερικών στιβάδων του ατόμου μεταπηδά σε άλλη επιτρεπόμενη τροχιά μεγαλύτερης ενέργειας. Η κενή θέση του ηλεκτρονίου μπορεί να συμπληρωθεί από ένα ηλεκτρόνιο του ατόμου που βρίσκεται στις εξωτερικές στιβάδες, με ταυτόχρονη εκπομπή ενός φωτονίου.

Επειδή οι επιτρεπόμενες τιμές της ενέργειας του ατόμου είναι καθορισμένες, οι συχνότητες των φωτονίων που εκπέμπονται θα είναι καθορισμένες. Το



φάσμα του φωτός που εκπέμπει το άτομο θα αποτελείται από γραμμές που είναι χαρακτηριστικές του υλικού της ανόδου.

Επειδή η ενέργεια που απαιτείται, για να εκδιωχθεί ένα ηλεκτρόνιο από μια εσωτερική τροχιά, είναι μεγάλη, θα πρέπει και η ενέργεια του ηλεκτρονίου που προκαλεί τη διέγερση να είναι μεγάλη. Επομένως απαιτείται το ηλεκτρόνιο να έχει επιταχυνθεί από μεγάλη διαφορά δυναμικού.

### **β. Συνεχές φάσμα**

Ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να επιβραδυνθεί εξαιτίας της αλληλεπίδρασής του με τα άτομα του στόχου. Όπως έχουμε αναφέρει, ένα επιταχυνόμενο (ή επιβραδυνόμενο) φορτίο εκπέμπει ακτινοβολία. Η απώλεια της κινητικής ενέργειας ( $K_{\alpha} - K_{\tau}$ ) του ηλεκτρονίου θα είναι ίση με την ενέργεια του φωτονίου  $hf$  που εκπέμπεται.

$$\text{Δηλαδή: } hf = K_{\alpha} - K_{\tau} \quad (4.9)$$

Το ηλεκτρόνιο μπορεί να χάσει όλη ή οποιοδήποτε μέρος της ενέργειάς του σε μία κρούση, δηλαδή μπορεί να ακινητοποιηθεί μετά από μία ή περισσότερες κρούσεις. Επειδή κατά τις κρούσεις των ηλεκτρονίων με τα άτομα του στόχου τα ηλεκτρόνια μπορεί να χάσουν οποιοδήποτε μέρος της ενέργειάς τους, συμπεραίνουμε ότι τα φωτόνια που εκπέμπονται θα έχουν οποιαδήποτε τιμή ενέργειας, που θα είναι μικρότερη ή ίση της αρχικής ενέργειας του ηλεκτρονίου. Επομένως το φάσμα της ακτινοβολίας αυτής θα είναι συνεχές.

### γ. Το μικρότερο μήκος κύματος

Το μικρότερο μήκος κύματος  $\lambda_{\min}$  της ακτινοβολίας εκπέμπεται, όταν η ενέργεια ενός ηλεκτρονίου μετατρέπεται σε ενέργεια ενός φωτονίου σε μία μόνο κρούση. Αντικαθιστώντας  $K_T = 0$  στην παραπάνω σχέση 2.9 βρίσκουμε:

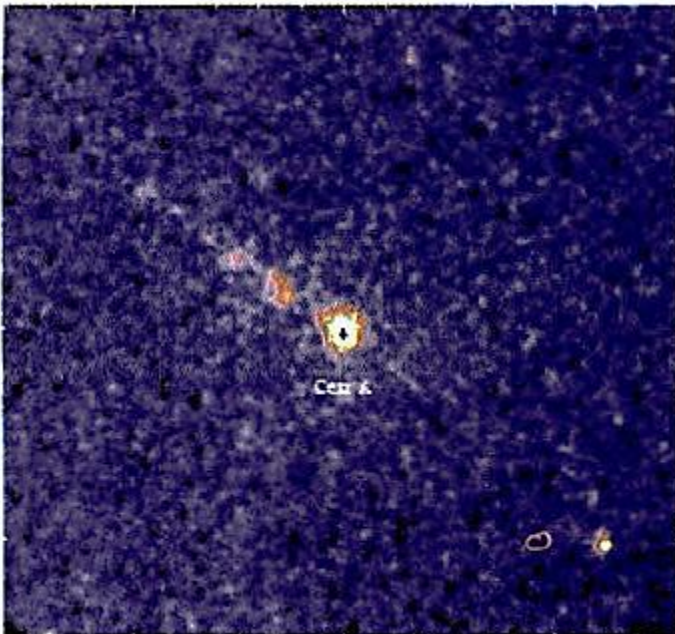
$$hf = K_\alpha \quad (4.10)$$

Η κινητική ενέργεια  $K_\alpha$  του ηλεκτρονίου είναι ίση με την ενέργεια  $eV$  που αποκτά μέσω της τάσης  $V$  που το επιταχύνει. Αντικαθιστώντας  $K_\alpha = eV$  στην παραπάνω σχέση, παίρνουμε:

$$hf = eV \quad \text{και επειδή} \quad f = \frac{c}{\lambda_{\min}}, \quad \text{βρίσκουμε :}$$

$$h \frac{c}{\lambda_{\min}} = eV, \quad \text{οπότε} \quad \lambda_{\min} = \frac{ch}{eV} \quad (4.11)$$

Παρατηρούμε ότι το ελάχιστο μήκος κύματος εξαρτάται μόνο από την τάση  $V$  που εφαρμόζεται μεταξύ της ανόδου και της καθόδου.



4.4 -23 Φωτογραφία με ακτίνες Χ, επεξεργασμένη με ηλεκτρονικό υπολογιστή, τον πυρήνα ενός γαλαξία στον αστερισμό τον Κενταύρου, όπου πιστεύουμε ότι

υπάρχει μια μαύρη τρύπα. Ακτίνες X εκπέμπονται, καθώς η μαύρη τρύπα έλκει μεγάλες ποσότητες μάζας από τη γύρω περιοχή και αυτές αποκτούν μεγάλες επιταχύνσεις.

### Απορρόφηση των ακτίνων X

Όταν οι ακτίνες X διαπερνούν οποιοδήποτε υλικό, τότε ένα μέρος της ακτινοβολίας απορροφάται από το υλικό. Η απορρόφηση της ακτινοβολίας εξαρτάται από τη φύση του υλικού, το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και το πάχος του υλικού.

α. Όσο μεγαλύτερος είναι ο ατομικός αριθμός  $Z$  των ατόμων του υλικού που απορροφά την ακτινοβολία τόσο μεγαλύτερη είναι η απορρόφηση της ακτινοβολίας. Το γεγονός αυτό εξηγεί γιατί στις ακτινογραφίες του ανθρώπινου σώματος τα οστά, τα οποία αποτελούνται από άτομα μεγαλύτερου ατομικού αριθμού, απορροφούν περισσότερη ακτινοβολία, ενώ οι ιστοί απορροφούν πολύ λιγότερη.

β. Όταν οι ακτίνες X διαπερνούν μια πλάκα, που έχει ορισμένο πάχος, τότε η απορρόφηση των ακτίνων αυξάνεται όσο αυξάνεται το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Οι ακτίνες X που έχουν μικρά μήκη κύματος είναι περισσότερο διεισδυτικές και ονομάζονται σκληρές ακτίνες, ενώ οι ακτίνες που έχουν μεγάλα μήκη κύματος είναι λιγότερο διεισδυτικές και ονομάζονται μαλακές ακτίνες.



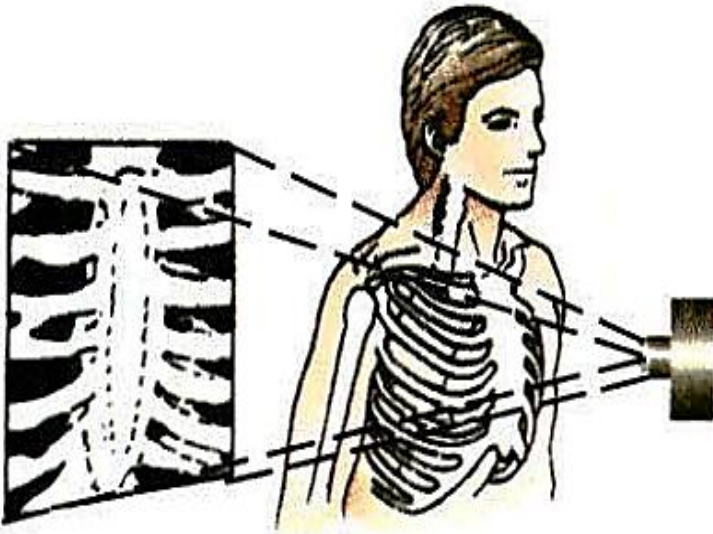
γ. Όσο το πάχος του υλικού είναι μεγαλύτερο τόσο μεγαλύτερη είναι και η απορρόφηση της ακτινοβολίας μέσα στο υλικό αυτό.

## Χρήσεις των ακτίνων Χ

### Στην Ιατρική

**α. Ακτινογραφία Ακτινοσκόπηση.** Όπως έχουμε αναφέρει, η απορρόφηση των ακτίνων Χ εξαρτάται από τον ατομικό αριθμό των χημικών στοιχείων του υλικού που τις απορροφά. Τα βαριά χημικά στοιχεία έχουν μεγάλο ατομικό αριθμό και απορροφούν περισσότερο την ακτινοβολία από ό,τι τα ελαφρά στοιχεία, τα οποία έχουν μικρό ατομικό αριθμό. Στην ιδιότητα αυτή στηρίζεται η χρήση των ακτίνων Χ στη διάγνωση πολλών παθήσεων. Τα οστά περιέχουν στοιχεία μεγάλου ατομικού αριθμού (ασβέστιο, φώσφορος) και απορροφούν περισσότερο τις ακτίνες από ό,τι οι ιστοί, οι οποίοι αποτελούνται από ελαφρότερα στοιχεία (άνθρακας, οξυγόνο, υδρογόνο, άζωτο και άλλα).

Αν λοιπόν μεταξύ της πηγής των ακτίνων Χ και μιας φθορίζουσας οθόνης τοποθετηθεί ο προς εξέταση ασθενής, τότε πάνω στην οθόνη θα φανούν οι σκιές των διάφορων οργάνων (ακτινοσκόπηση). Αν στη θέση της φθορίζουσας οθόνης τοποθετηθεί μια φωτογραφική πλάκα, τότε θα πάρουμε πάνω στην πλάκα την ανάλογη φωτογραφία (ακτινογραφία).

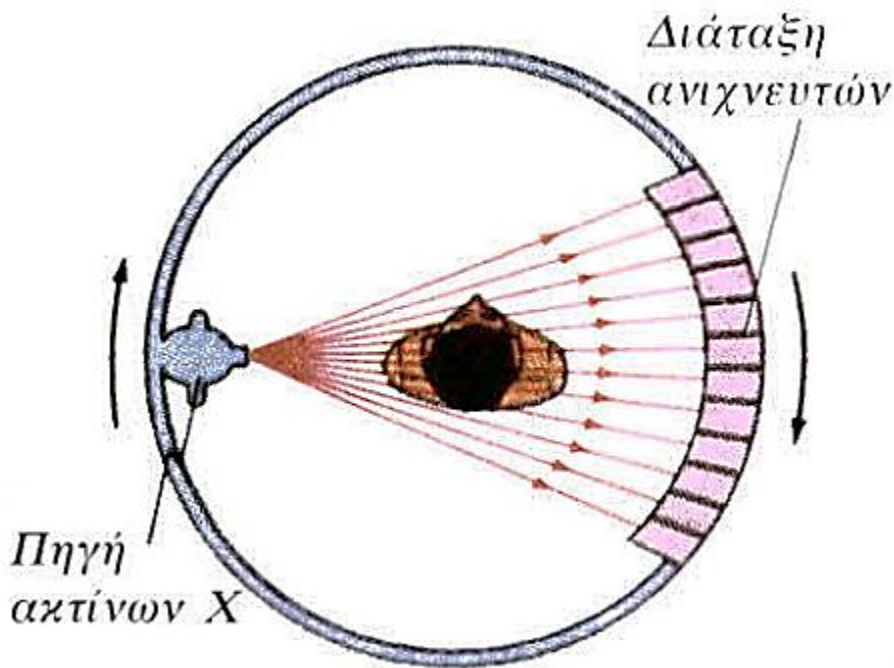


**4.4 -24 Ακτινογραφία.** Τα οστά απορρίπτουν εντονότερα τις ακτίνες Χ σε σύγκριση με τον υπόλοιπο ιστό. Έτσι στο φιλμ εμφανίζονται ως φωτεινότερες περιοχές.

**β. Αυτοματοποιημένη αξονική τομογραφία.** Τελευταία χρησιμοποιείται η αυτοματοποιημένη αξονική τομογραφία. Η πηγή των ακτίνων Χ παράγει μια αποκλίνουσα δέσμη, που έχει μορφή βεντάλιας. Οι ακτίνες της δέσμης διαπερνούν το ανθρώπινο σώμα και, όταν εξέρχονται από την άλλη πλευρά του σώματος, ανιχνεύονται, με διάταξη ανιχνευτών. Κάθε ανιχνευτής μετράει την απορρόφηση μιας λεπτής δέσμης, που διαπερνά το σώμα. Η συσκευή περιστρέφεται γύρω από το ανθρώπινο σώμα και ένας υπολογιστής επεξεργάζεται τις πληροφορίες.

Με αυτό τον τρόπο μπορούν να ανιχνευτούν όγκοι ή άλλες ανωμαλίες που είναι πολύ μικροί και δεν μπορούν να παρατηρηθούν με την ακτινογραφία.





**4.4 -25 Αρχή λειτουργίας αξονικού τομογράφου. Οι ακτίνες Χ, που περνούν μέσα από το σώμα μετρούνται συγχρόνως σε κάθε διεύθυνση. Η πηγή και ο ανιχνευτής περιστρέφονται, ώστε να έχουμε μετρήσεις σε διαφορετικές γωνίες.**

### **Στη βιομηχανία**

Οι ακτίνες Χ χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία, για να διαπιστωθεί η ύπαρξη κοιλοτήτων, ραγισμάτων ή άλλων ελαττωμάτων στο εσωτερικό των μεταλλικών αντικειμένων. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι ίδια με τη διαδικασία της ακτινοδιαγνωστικής. Τα ελαττωματικά σημεία εντοπίζονται από το γεγονός ότι προκαλούν μικρότερη απορρόφηση.

### **Βιολογικές βλάβες που προκαλούν οι ακτίνες Χ**

Οι ακτίνες Χ προκαλούν βλάβες στους οργανισμούς. Όταν απορροφηθούν από τους ιστούς, διασπούν τους μοριακούς δεσμούς και δημιουργούν ενεργές ελεύθερες ρίζες, που με τη σειρά τους μπορεί να διαταράξουν τη



μοριακή δομή των πρωτεϊνών και ειδικά του γενετικού υλικού (DNA).

Αν το κύτταρο που έχει υποστεί βλάβη από την ακτινοβολία επιβιώσει, τότε μπορεί να δώσει πολλές γενεές μεταλλαγμένων κυττάρων. Αν οι αλλαγές στο DNA αφορούν γονίδια που ελέγχουν το ρυθμό πολλαπλασιασμού των κυττάρων, οι ακτίνες X μπορεί να προκαλέσουν καρκίνο. Η υπερβολική έκθεση ενός οργανισμού σε ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει μεταβολές στα γενετικά κύτταρα. Σ' αυτή την περίπτωση, ενώ ο ίδιος οργανισμός δε θα εμφανίσει κάποια βλάβη, θα επηρεαστούν οι απόγονοι του.

Η χρήση των ακτίνων X για διαγνωστικούς και θεραπευτικούς σκοπούς πρέπει να γίνεται με προσοχή, εκτιμώντας τόσο τα οφέλη όσο και τους κινδύνους που προέρχονται από την έκθεση του οργανισμού σε ακτινοβολία για μεγάλο χρονικό διάστημα.

#### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4 – 5

Τα ηλεκτρόνια σε ένα σωλήνα ακτίνων X επιταχύνονται με διαφορά δυναμικού 50kV. Αν ένα ηλεκτρόνιο παράγει ένα φωτόνιο κατά την πρόσκρουσή του στο στόχο, να υπολογιστεί το ελάχιστο μήκος κύματος των ακτίνων X που παράγονται.

**ΛΥΣΗ** Το ελάχιστο μήκος κύματος αντιστοιχεί στη μέγιστη ενέργεια του εκπεμπόμενου φωτονίου  $hf_{\max}$ . Αυτό συμβαίνει, όταν όλη η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου  $eV$  χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενός φωτονίου.

Έχουμε λοιπόν:

$$eV = hf_{\max} \quad \text{και επειδή} \quad c = \lambda_{\min} f_{\max} \quad \text{ή} \quad f_{\max} = \frac{c}{\lambda_{\min}}$$

$$\text{βρίσκουμε} \quad eV = h \frac{c}{\lambda_{\min}} \quad \text{ή}$$

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eV} = \frac{(6,63 \cdot 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s})(3 \cdot 10^8 \text{m/s})}{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{C})(50 \cdot 10^3 \text{V})} = 2,5 \cdot 10^{-11} \text{m}$$

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4 – 6

Σε μια ακτινογραφία απαιτούνται ακτίνες X με μήκος κύματος  $\lambda = 1,5 \cdot 10^{-11} \text{m}$ . Η ένταση του ρεύματος της δέσμης των ηλεκτρονίων είναι  $I = 40 \text{mA}$  και ο χρόνος λήψης της ακτινογραφίας είναι  $t = 0,1 \text{s}$ .

Να υπολογιστούν:

(α) Η τάση που πρέπει να εφαρμοστεί μεταξύ της ανόδου και της καθόδου.

(β) Η ισχύς και η ενέργεια που μεταφέρει η δέσμη των ηλεκτρονίων.

(γ) Ο αριθμός των ηλεκτρονίων που προσπίπτουν στην άνοδο. (Θεωρούμε ότι όλη η ενέργεια κάθε ηλεκτρονίου μετατρέπεται σε ενέργεια ενός φωτονίου.)

**ΛΥΣΗ** (α) Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας έχει ενέργεια  $hf$  ή  $hc/\lambda$ . Η ενέργεια του φωτονίου είναι ίση με την κινητική ενέργεια που απέκτησε το ηλεκτρόνιο εξαιτίας της επιτάχυνσής του μέσω της τάσης  $V$ . Άρα :

$$eV = h \frac{c}{\lambda} \quad \text{ή} \quad V = \frac{hc}{\lambda e}$$

$$V = \frac{(6,6 \cdot 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s})(3 \cdot 10^8 \text{m/s})}{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{C})(1,50 \cdot 10^{-11} \text{m})} \quad \text{ή} \quad V = 82500 \text{V}$$

(β) Η ισχύς που μεταφέρει η δέσμη των ηλεκτρονίων είναι:

$$P = V \cdot I = 82500 \cdot 40 \cdot 10^{-3} \text{W} = 3300 \text{W}$$

Η ενέργεια που μεταφέρει η δέσμη είναι:

$$W = P \cdot t = 3300 \cdot 0,1 \text{J} = 330 \text{J}$$

(γ) Το φορτίο  $q$  που προσπίπτει στην άνοδο σε χρόνο  $t$  είναι:

$$q = I \cdot t = 40 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 \text{C} = 4 \cdot 10^{-3} \text{C}$$

και ο αριθμός των ηλεκτρονίων που προσπίπτουν στην άνοδο είναι:

$$N = \frac{q}{e} = \frac{4 \cdot 10^{-3} \text{C}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}} = 2,5 \cdot 10^{16} \text{ ηλεκτρόνια}$$

## ΣΥΝΟΨΗ 4ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Σύμφωνα με το πρότυπο του Thomson, το άτομο αποτελείται από μία σφαίρα ομοιόμορφα κατανεμημένου θετικού φορτίου, μέσα στην οποία είναι ενσωματωμένα τα ηλεκτρόνια.
- Σύμφωνα με το πρότυπο του Rutherford, το άτομο αποτελείται:
  - i. από μια μικρή περιοχή (πυρήνας), στην οποία είναι συγκεντρωμένο όλο το θετικό φορτίο και όλη σχεδόν η μάζα του ατόμου,
  - ii. από τα ηλεκτρόνια, τα οποία κινούνται σε κυκλικές τροχιές γύρω από τον πυρήνα.
- Το υδρογόνο, όπως και όλα τα αέρια, μπορεί να εκπέμπει μόνο ορισμένες ακτινοβολίες και να απορροφά μόνο εκείνες τις ακτινοβολίες τις οποίες μπορεί να εκπέμπει.
- Για να ερμηνεύσει ο Bohr το φάσμα του υδρογόνου, διατύπωσε τις παρακάτω ιδέες:
  - i. Το ηλεκτρόνιο στο άτομο του υδρογόνου μπορεί να κινείται μόνο σε ορισμένες επιτρεπόμενες τροχιές, για τις οποίες η στροφορμή του είναι  $mvr = n \cdot (h/2\pi) = n\hbar$  ( $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$ ).
  - ii. Αν το ηλεκτρόνιο του ατόμου μεταπηδήσει από μία επιτρεπόμενη τροχιά ενέργειας  $E_\alpha$  σε άλλη τροχιά μικρότερης ενέργειας  $E_\tau$ , τότε το άτομο εκπέμπει ένα φωτόνιο συχνότητας  $f$  και ισχύει:  $E_\alpha - E_\tau = hf$ .

- Η ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου του ατόμου του υδρογόνου δίνεται από τη σχέση:  $E = -k\frac{e^2}{2r}$
- Οι ακτίνες των επιτρεπόμενων τροχιών και οι αντίστοιχες τιμές της ολικής ενέργειας του ηλεκτρονίου δίνονται από τις σχέσεις:  $r_n = n^2 r_1$  και  $E_n = \frac{E_1}{n^2}$  ( $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$ )
- Οι επιτρεπόμενες τιμές της ενέργειας ονομάζονται ενεργειακές στάθμες. Οι αντίστοιχες καταστάσεις του ατόμου ονομάζονται ενεργειακές καταστάσεις. Η κατάσταση με τη χαμηλότερη ενέργεια  $E_1$  ονομάζεται θεμελιώδης κατάσταση. Όλες οι άλλες ενεργειακές καταστάσεις  $E_2, E_3, \dots$  ονομάζονται διεγερμένες καταστάσεις.
- Η μετάβαση ενός ηλεκτρονίου του ατόμου από μία τροχιά χαμηλής ενέργειας σε άλλη υψηλότερης ενέργειας ονομάζεται διέγερση του ατόμου. Η απομάκρυνση ενός ηλεκτρονίου του ατόμου σε περιοχή εκτός του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα ονομάζεται ιονισμός του ατόμου.
- Οι ακτίνες X παράγονται, όταν ηλεκτρόνια μεγάλης ταχύτητας, που έχουν επιταχυνθεί από υψηλή τάση, προσπίπτουν σε μεταλλικό στόχο. Είναι αόρατη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, που έχει μήκη κύματος πολύ μικρότερα από τα μήκη κύματος των ορατών ακτινοβολιών.
- Το φάσμα των ακτινών X είναι σύνθετο. Αποτελείται από ένα συνεχές φάσμα πάνω στο οποίο εμφανίζονται μερικές γραμμές (γραμμικό φάσμα).
- Το μικρότερο μήκος κύματος  $\lambda_{\min}$  των ακτινών X εκπέμπεται, όταν το ηλεκτρόνιο δίνει όλη την κινητική

του ενέργεια σε ένα φωτόνιο σε μία μόνο κρούση.  
Το μικρότερο μήκος κύματος δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda_{\min} = \frac{ch}{eV}$$

- Οι ακτίνες X προκαλούν βιολογικές βλάβες.

## ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1. Ποιο είναι το πρότυπο του Thomson για το άτομο;
2. Ποιο είναι το πρότυπο του Rutherford για το άτομο;
3. Όταν μία δέσμη σωματίων  $\alpha$  κατευθύνεται σε λεπτό μεταλλικό φύλλο στόχου, τότε παρατηρούμε ότι:
  - I. τα περισσότερα σωματάρια  $\alpha$  περνάνε ανεπηρέαστα μέσα από το στόχο,
  - II. αρκετά σωματάρια  $\alpha$  αποκλίνουν σε διάφορες γωνίες, ενώ λίγα αποκλίνουν κατά  $180^\circ$ .Ποια από τις παραπάνω παρατηρήσεις δείχνει ότι:
  - α. Ο χώρος μέσα στο άτομο είναι σχεδόν κενός.
  - β. Το θετικό φορτίο του ατόμου είναι συγκεντρωμένο στο κέντρο του ατόμου.
  - γ. Το κέντρο του ατόμου είναι θετικά φορτισμένο.
4. Να εξηγήσετε γιατί το πρότυπο του Rutherford αδυνατεί να ερμηνεύσει τα γραμμικά φάσματα των αερίων.
5. Να διατυπώσετε το πρότυπο του Bohr για το άτομο του υδρογόνου.
6. Να υπολογίσετε την κινητική, τη δυναμική και την ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου του ατόμου του υδρογόνου σε συνάρτηση με την ακτίνα της τροχιάς του.
7. Να σχεδιάσετε το διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών για το άτομο του υδρογόνου.
8. Τι ονομάζεται:
  - α. διέγερση,
  - β. ιονισμός,
  - γ. ενέργεια διέγερσης και
  - δ. ενέργεια ιονισμού;
9. Να περιγράψετε το μηχανισμό διέγερσης του ατόμου:



- α. λόγω κρούσης και
- β. λόγω απορρόφησης ακτινοβολίας.

**10.** Ποια γραμμικά φάσματα μπορεί να ερμηνεύσει το πρότυπο του Bohr και ποια δεν μπορεί;

**11.** Πώς παράγονται οι ακτίνες X;

**12.** Πώς ερμηνεύεται το γραμμικό φάσμα των ακτινών X και πώς το συνεχές φάσμα;

**13.** Να υπολογιστεί το ελάχιστο μήκος κύματος των ακτίνων X.

**14.** Από ποιους παράγοντες εξαρτάται η απορρόφηση των ακτίνων X και με ποιο τρόπο;

**15.** Ποια είναι η φύση των ακτίνων X;

**16.** Πού χρησιμοποιούνται οι ακτίνες X;

**17.** Ποιες είναι οι βιολογικές βλάβες που προκαλούν οι ακτίνες X;

**18.** Πώς επηρεάζονται οι ακτίνες X:

α. από τη θερμοκρασία της καθόδου,

β. από την τάση που εφαρμόζεται μεταξύ της ανόδου και της καθόδου,

γ. από το υλικό της ανόδου;

(Στις ερωτήσεις πολλαπλής επιλογής που ακολουθούν να κυκλώσετε το γράμμα που αντιστοιχεί στη σωστή απάντηση.)

**19.** Το ηλεκτρόνιο στο άτομο του υδρογόνου, το οποίο βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση:

α. έχει απομακρυνθεί από το άτομο.

β. ηρεμεί.

γ. είναι σε τροχιά με τη χαμηλότερη ενέργεια.

δ. είναι σε τροχιά με την υψηλότερη ενέργεια.

**20.** Ένα άτομο εκπέμπει ένα φωτόνιο, όταν ένα από τα ηλεκτρόνιά του:

α. απομακρύνεται από το άτομο.

- β. μεταβαίνει σε τροχιά μικρότερης ενέργειας.
- γ. μεταβαίνει σε τροχιά μεγαλύτερης ενέργειας.
- δ. περιφέρεται σε επιτρεπόμενη τροχιά.

**21.** Το γραμμικό φάσμα εκπομπής αερίου περιέχει μήκη κύματος που είναι:

- α. ίδια για όλα τα στοιχεία.
- β. χαρακτηριστικά του στοιχείου που το εκπέμπει.
- γ. διαφορετικά από τα μήκη κύματος του φάσματος απορρόφησης του ίδιου στοιχείου.
- δ. στην περιοχή του ορατού.

**22.** Ποιο από τα παρακάτω πειραματικά δεδομένα δείχνει την ύπαρξη διακριτών ενεργειακών σταθμών στα άτομα;

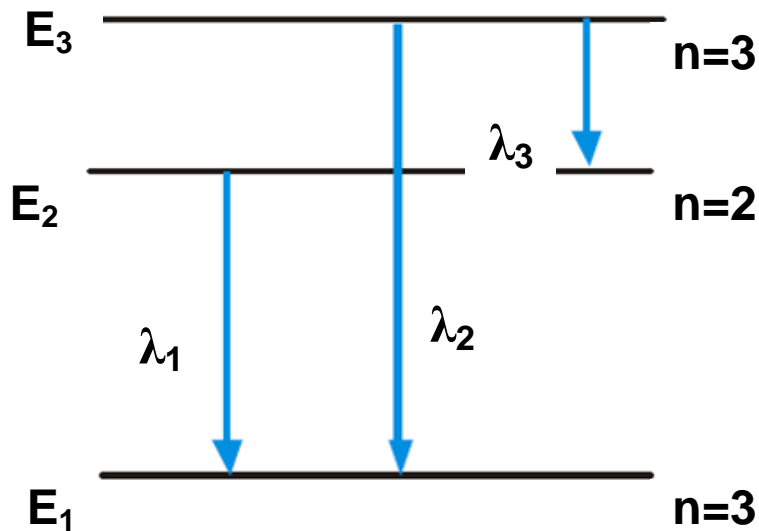
- α. Το φάσμα εκπομπής ενός στοιχείου περιέχει φωτεινότερες γραμμές σε μεγαλύτερη θερμοκρασία.
- β. Το φάσμα απορρόφησης ενός στοιχείου έχει σκοτεινές γραμμές στις θέσεις που αντιστοιχούν στις φωτεινές γραμμές του φάσματος εκπομπής.
- γ. Το φάσμα των ακτινών X παρουσιάζει ένα ελάχιστο μήκος κύματος.

**23.** Ποια από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστή;

- α. Η ενέργεια ιονισμού είναι μικρότερη από την ενέργεια διέγερσης.
- β. Η ενέργεια ενός φωτονίου είναι  $h\lambda$ , όπου  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.
- γ. Ένα ηλεκτρόνιο που βρίσκεται σε διεγερμένη ενεργειακή στάθμη ακτινοβολεί συνεχώς ενέργεια.
- δ. Η θεμελιώδης κατάσταση του ατόμου του υδρογόνου είναι η κατάσταση στην οποία το ηλεκτρόνιο βρίσκεται στη χαμηλότερη επιτρεπτή ενεργειακή στάθμη.

**24.** Το σχήμα δείχνει το διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών του ατόμου του υδρογόνου. Τα μήκη κύματος

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  είναι τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται κατά τις μεταβάσεις του ηλεκτρονίου μεταξύ των ενεργειακών σταθμών, όπως δείχνουν τα βέλη.



Ποια από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστή;

α.  $\lambda_2 = \lambda_1 + \lambda_3$

β.  $\lambda_2 > \lambda_3$

γ.  $f_2 = f_1 + f_3$

δ.  $f_2 = \frac{f_1 f_3}{f_1 + f_3}$

**25.** Το φάσμα απορρόφησης ενός αερίου εμφανίζει μια συνεχή χρωματιστή ταινία που διακόπτεται από σκοτεινές γραμμές:

α. Οι θέσεις των σκοτεινών γραμμών είναι χαρακτηριστικές του στοιχείου.

β. Μπορεί δύο διαφορετικά στοιχεία να έχουν το ίδιο φάσμα απορρόφησης.

γ. Οι σκοτεινές γραμμές δημιουργούνται, γιατί το λευκό φως απορροφά την ακτινοβολία που εκπέμπει το αέριο.

δ. Οι θέσεις των σκοτεινών γραμμών εξαρτώνται από τη θερμοκρασία του αερίου.

**26.** Το γραμμικό φάσμα των ακτίνων X αποτελείται από δύο γραμμές που αντιστοιχούν σε μήκη κύματος  $\lambda_1$  και  $\lambda_2$  αντίστοιχα. Οι γραμμές αυτές θα μετατοπιστούν, αν αλλάξουμε:

- α. το υλικό της ανόδου.
- β. την τάση μεταξύ της ανόδου και της καθόδου.
- γ. τη θερμοκρασία της καθόδου.
- δ. τη θερμοκρασία της ανόδου.

**27.** Το ελάχιστο μήκος κύματος  $\lambda_{\min}$  του συνεχούς φάσματος των ακτίνων X θα μεταβληθεί, αν μεταβάλλουμε:

- α. το υλικό της ανόδου.
- β. τη θερμοκρασία της καθόδου.
- γ. τη διαφορά δυναμικού μεταξύ της ανόδου και της καθόδου.
- δ. τη θερμοκρασία της ανόδου.

Θεωρούμε ότι τα ηλεκτρόνια ξεκινούν από την κάθοδο με μηδενική ταχύτητα.

**28.** Σύμφωνα με το πρότυπο του Bohr για το άτομο του υδρογόνου:

- α. το ηλεκτρόνιο εκπέμπει συνεχώς ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.
- β. η στροφορμή του ηλεκτρονίου μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή.
- γ. το άτομο αποτελείται από μία σφαίρα θετικού φορτίου ομοιόμορφα κατανεμημένου.
- δ. το ηλεκτρόνιο κινείται μόνο σε επιτρεπτές τροχιές.

**29.** Ποιες από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστές και ποιες λανθασμένες;

- α. Σύμφωνα με το πρότυπο του Rutherford τα άτομα θα έπρεπε να εκπέμπουν συνεχές και όχι γραμμικό φάσμα.
- β. Ο Thomson πρότεινε το λεγόμενο πλανητικό μοντέλο για το άτομο.
- γ. Σύμφωνα με το πρότυπο του Bohr, το ηλεκτρόνιο στο άτομο του υδρογόνου, εκπέμπει ακτινοβολία όταν κινείται σε επιτρεπόμενη τροχιά.

δ. Το σωματίο α είναι ένας πυρήνας ηλίου ( ${}^4_2\text{He}$ ).

**30.** Ποιες από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστές και ποιες λανθασμένες;

Στο πρότυπο του Bohr για το άτομο του υδρογόνου:

α. Η ακτίνα της νιοστής τροχιάς του ηλεκτρονίου είναι ανάλογη του  $n^2$ .

β. Η ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου στη νιοστή τροχιά είναι αντιστρόφως ανάλογη του κύριου κβαντικού αριθμού  $n$ .

γ. Η στροφορμή του ηλεκτρονίου είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του  $h/2\pi$ .

δ. Το μέτρο της δυναμικής ενέργειας του ηλεκτρονίου σε μια τροχιά είναι μεγαλύτερο από την κινητική του ενέργεια.

**31.** Στο πρότυπο του Bohr για το άτομο του υδρογόνου ο λόγος της κινητικής ενέργειας του ηλεκτρονίου σε μια τροχιά προς την ολική ενέργεια, είναι:

α. -1      β. 1      γ. 1/2      δ. 2

**32.** Η ενέργεια ιονισμού του ατόμου του υδρογόνου είναι 13,6eV. Η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για να διεγερθεί το άτομο του υδρογόνου από τη θεμελιώδη κατάσταση είναι:

α. 3,4eV      β. 13,6eV  
γ. -13,6eV      δ. 10,2eV

**33.** Το ελάχιστο μήκος κύματος των ακτίνων X εξαρτάται:

α. από την ένταση του ρεύματος.

β. από την τάση που εφαρμόζεται μεταξύ της ανόδου και της καθόδου.

γ. από τη φύση του αερίου που περιέχεται στο σωλήνα παραγωγής των ακτίνων X.

δ. από το υλικό της ανόδου.

## ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Οι παρακάτω φυσικές σταθερές θεωρούνται γνωστές:

Σταθερά του νόμου Coulomb:  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$

Φορτίο ηλεκτρονίου:  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Μάζα ηλεκτρονίου:  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

Σταθερά Planck:  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

Ταχύτητα του φωτός στο κενό:  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

$1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

1. Το άτομο του υδρογόνου βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση. Η ακτίνα της τροχιάς του ηλεκτρονίου είναι  $r = 5,3 \times 10^{-11} \text{ m}$ . Να υπολογιστούν:

α. η ταχύτητα του ηλεκτρονίου,

β. η περίοδος της κίνησης του ηλεκτρονίου,

γ. η κινητική, η δυναμική και η ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου.

2. Η ενέργεια του ατόμου του υδρογόνου, όταν αυτό βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση, είναι  $-13,6\text{eV}$ :

α. Ποια θα είναι η ενέργεια του ατόμου στην πρώτη διεγερμένη κατάσταση ( $n = 2$ ) και ποια στη δεύτερη διεγερμένη κατάσταση ( $n = 3$ );

β. Το άτομο διεγείρεται και αποκτά ενέργεια  $-0,85\text{eV}$ . Σε ποιο κύριο κβαντικό αριθμό αντιστοιχεί η διεγερμένη αυτή κατάσταση;

3. Η ενέργεια του ατόμου του υδρογόνου, όταν βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση, είναι  $-13,6\text{eV}$ . Ηλεκτρόνια συγκρούονται με άτομα του υδρογόνου τα οποία βρίσκονται στη θεμελιώδη κατάσταση. Τα άτομα διεγείρονται και εκπέμπουν γραμμικό φάσμα που αποτελείται μόνο από μία γραμμή ορισμένης



συχνότητας. Ποια είναι η ελάχιστη και ποια η μέγιστη ενέργεια των ηλεκτρονίων που διεγείρουν τα άτομα του υδρογόνου; (Η ορμή του ατόμου δε μεταβάλλεται κατά την κρούση.)

**4.** Διεγερμένα άτομα υδρογόνου βρίσκονται σε κατάσταση που αντιστοιχεί σε κβαντικό αριθμό  $n = 4$ :

α. Να υπολογιστεί το πλήθος των γραμμών του φάσματος εκπομπής του αερίου.

β. Να σχεδιαστεί το διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών, στο οποίο να φαίνονται οι μεταβάσεις που πραγματοποιούνται.

**5.** Το άτομο του υδρογόνου βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση στην οποία η ολική ενέργεια είναι  $-13,6\text{eV}$ :

α. Ποια ελάχιστη ενέργεια απαιτείται, για να ιονιστεί το άτομο;

β. Ποια ενέργεια απαιτείται, για να διεγερθεί το άτομο στην πρώτη διεγερμένη κατάσταση ( $n = 2$ );

γ. Το άτομο του υδρογόνου απορροφά, λόγω κρούσης, ενέργεια  $15\text{eV}$  και ιονίζεται. Ποια κινητική ενέργεια αποκτά τελικά το ηλεκτρόνιο, αν η κινητική ενέργεια του ατόμου δε μεταβάλλεται κατά την κρούση;

**6.** Ηλεκτρόνια επιταχύνονται μέσω τάσης  $12,3\text{V}$  και περνάνε μέσα από αέριο που αποτελείται από άτομα υδρογόνου τα οποία βρίσκονται στη θεμελιώδη κατάσταση. Να υπολογιστούν τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπει το αέριο. Η ενέργεια του ατόμου του υδρογόνου στη θεμελιώδη κατάσταση είναι  $-13,6\text{eV}$ .

**7.** Σε σωλήνα παραγωγής ακτινών X τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται από τάση  $10\text{kV}$ . Να υπολογιστεί η

μέγιστη συχνότητα και το ελάχιστο μήκος κύματος των ακτινών X που παράγονται.

**8.** Σε σωλήνα παραγωγής ακτίνων X εφαρμόζεται τάση (α)  $V_1 = 10\text{KV}$ , (β).  $V_2 = 40\text{KV}$ . Τα αντίστοιχα ελάχιστα μήκη κύματος των ακτίνων X είναι  $\lambda_1$  και  $\lambda_2$ . Να υπολογιστεί ο λόγος  $\lambda_1/\lambda_2$ .

**9.** Σε μια ακτινογραφία απαιτούνται ακτίνες X μήκους κύματος  $\lambda=10^{-10}$  m. Η ένταση του ρεύματος της δέσμης των ηλεκτρονίων είναι 40mA και ο χρόνος λήψης της ακτινογραφίας είναι 0,1s. Θεωρούμε ότι όλη η κινητική ενέργεια κάθε ηλεκτρονίου μετατρέπεται σε ενέργεια ενός φωτονίου:

α. Ποια τάση εφαρμόζεται στο σωλήνα παραγωγής ακτίνων X;

β. Πόση ισχύ και πόση ενέργεια μεταφέρει η ηλεκτρονική δέση;

γ. Ποια είναι η ταχύτητα των ηλεκτρονίων τη στιγμή που προσπίπτουν στην άνοδο;

δ. Πόσα ηλεκτρόνια ανά δευτερόλεπτο προσπίπτουν στην άνοδο;

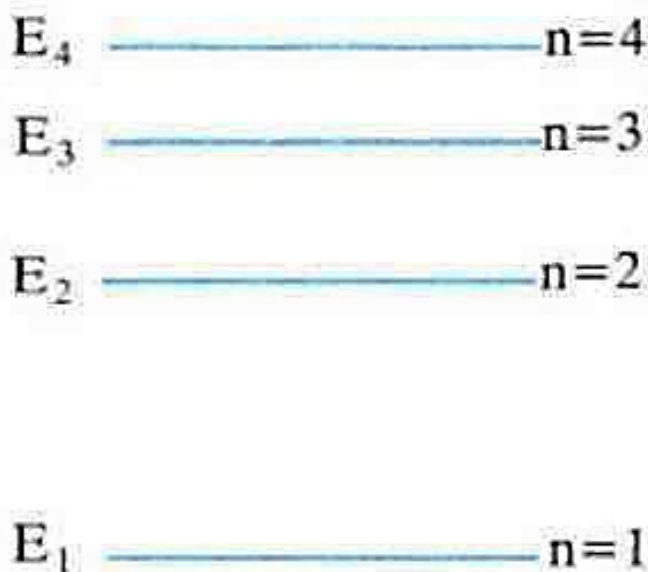
ε. Η ισχύς της ακτινοβολίας X αν η απόδοση της συσκευής σε ακτίνες X είναι 2%.

στ. Η ενέργεια που μεταφέρεται από την ακτινοβολία σε χρονικό διάστημα  $\Delta t=0,1\text{s}$ .

ζ. Η μεταβολή επί τοις % στην τιμή της ανοδικής τάσης, αν θέλουμε το ελάχιστο μήκος κύματος του συνεχούς φάσματος να ελαττωθεί κατά 20%. (Θεωρούμε ότι όλη η ενέργεια κάθε ηλεκτρονίου μετατρέπεται σε ενέργεια ενός φωτονίου.)

**10.** Ένα άτομο υδρογόνου βρίσκεται στη θεμελιώδη του κατάσταση ( $n = 1$ ) με ενέργεια  $E_1 = -13,6\text{eV}$ . Στο σχήμα

δίνεται το διάγραμμα των τεσσάρων πρώτων ενεργειακών σταθμών του ατόμου του υδρογόνου.



α. Να υπολογίσετε την ενέργεια κάθε διεγερμένης κατάστασης ( $n = 2$ ,  $n = 3$ ,  $n = 4$ ).

β. Ένα σωματίδιο με κινητική ενέργεια  $K_1 = 13\text{eV}$  συγκρούεται με το παραπάνω άτομο υδρογόνου. Το άτομο απορροφά τμήμα της κινητικής ενέργειας του σωματιδίου και διεγείρεται στην ενεργειακή στάθμη με κύριο κβαντικό αριθμό  $n = 3$ . Να υπολογίσετε την τελική κινητική ενέργεια του σωματιδίου.

γ. Το διεγερμένο άτομο, μετά από ελάχιστο χρονικό διάστημα, επανέρχεται στη θεμελιώδη του κατάσταση. Να μεταφέρετε το σχήμα των ενεργειακών σταθμών στο τετράδιο σας και να σχεδιάσετε τις δυνατές μεταβάσεις του ηλεκτρονίου από τη διεγερμένη κατάσταση στη θεμελιώδη κατάσταση.

δ. Σε μια από τις παραπάνω μεταβάσεις εκπέμπεται ακτινοβολία με τη μεγαλύτερη συχνότητα. Να υπολογίσετε τη συχνότητα αυτή.

**11.** Διεγερμένα άτομα υδρογόνου αποδιεγείρονται και τα άτομα επανέρχονται στη θεμελιώδη κατάσταση. Η ενέργεια της θεμελιώδους κατάστασης είναι  $E_1 = -13,6\text{eV}$ . Από τη μελέτη των φασματικών γραμμών υπολογίστηκαν τρεις διαφορές ενεργειών μεταξύ των διεγερμένων καταστάσεων και της θεμελιώδους κατάστασης και βρέθηκαν ίσες με  $12,75\text{eV}$ ,  $12,09\text{eV}$  και  $10,2\text{eV}$ .

α. Να υπολογίσετε τις ενέργειες που αντιστοιχούν στις διεγερμένες καταστάσεις των ατόμων υδρογόνου.

β. Να υπολογίσετε τους κβαντικούς αριθμούς στους οποίους αντιστοιχούν οι διεγερμένες καταστάσεις.

γ. Να σχεδιάσετε το διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών, στο οποίο να φαίνονται οι μεταβάσεις των ηλεκτρονίων που πραγματοποιούνται.

δ. Σε ένα από τα άτομα του υδρογόνου, που βρίσκεται πλέον στη θεμελιώδη κατάσταση, προσπίπτει μονοχρωματική ακτινοβολία, με συνέπεια το ηλεκτρόνιο του ατόμου του υδρογόνου να έχει κινητική ενέργεια  $K = 6,29\text{eV}$ , σε περιοχή όπου η επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα είναι πρακτικά μηδέν. Να υπολογίσετε τη συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

**12.** Προκειμένου να διαπιστωθεί η ύπαρξη κοιλότητας στο εσωτερικό ενός μεταλλικού αντικειμένου, χρησιμοποιούνται ακτίνες Χ. Στη διάταξη παραγωγής των ακτίνων Χ, η τάση που εφαρμόζεται μεταξύ της ανόδου και της καθόδου είναι  $16.575\text{V}$ . Τα ηλεκτρόνια ξεκινούν από την κάθοδο με μηδενική ταχύτητα, επιταχύνονται και προσπίπτουν στη άνοδο. Θεωρούμε ότι η θερμοκρασία της καθόδου είναι σταθερή και ότι η κινητική ενέργεια κάθε ηλεκτρονίου μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε ενέργεια ενός φωτονίου σε μία μόνο κρούση. Να υπολογίσετε:

α. την κινητική ενέργεια που έχει κάθε ηλεκτρόνιο όταν φθάνει στην άνοδο.

β. το ελάχιστο μήκος κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το υλικό της ανόδου.

Στην παραπάνω διάταξη παραγωγής ακτινών Χ, μεταβάλλοντας την τάση της ανόδου και καθόδου, η αρχική ισχύς  $P_1$ , της δέσμης των ηλεκτρονίων τετραπλασιάζεται και παίρνει την τιμή  $P_2 = 4P_1$ , ενώ η θερμοκρασία της καθόδου διατηρείται σταθερή και η ένταση του ρεύματος των ηλεκτρονίων παραμένει η ίδια. Να υπολογίσετε:

γ. το λόγο των ταχυτήτων  $u_1 / u_2$ , όπου  $u_1$  και  $u_2$  οι ταχύτητες με τις οποίες τα ηλεκτρόνια προσπίπτουν στην άνοδο πριν και μετά τον τετραπλασιασμό της ισχύος, αντίστοιχα.

δ. το ελάχιστο μήκος κύματος της παραγόμενης ακτινοβολίας, μετά τον τετραπλασιασμό της ισχύος και να δικαιολογήσετε ποια από τις δύο ακτινοβολίες είναι περισσότερο διεισδυτική.

## Αιτιοκρατία και κβαντομηχανική

Η επιτυχία των επιστημονικών θεωριών, ιδιαίτερα της θεωρίας του Νεύτωνα για τη βαρύτητα, οδήγησε στις αρχές του 19ου αιώνα το Γάλλο φυσικό Pierre Simon Laplace (Λαπλάς) να υποστηρίξει ότι το Σύμπαν είναι απολύτως ντετερμινιστικό (αιτιοκρατικό). Υπέθεσε ότι πρέπει να υπάρχει ένα σύνολο φυσικών νόμων, που θα μας επέτρεπε να προβλέψουμε οτιδήποτε συμβαίνει στο Σύμπαν, αν γνωρίζαμε απόλυτα την κατάστασή του σε κάποια χρονική στιγμή.

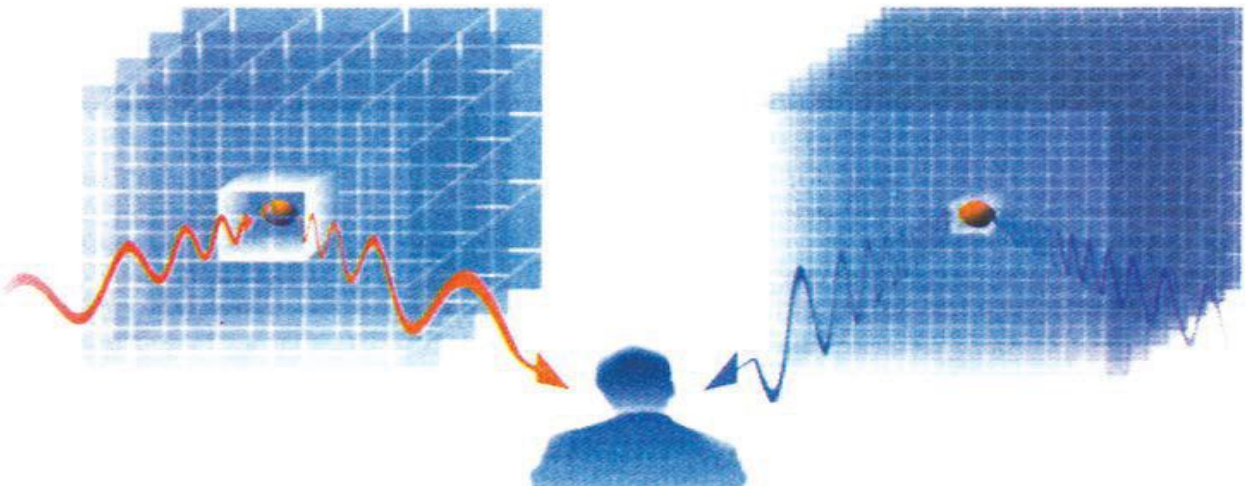
Ο Laplace όμως δεν περιορίστηκε σ' αυτό. Υποστήριξε ότι υπάρχουν παρόμοιοι νόμοι που προσδιορίζουν τα πάντα, ακόμη και την ανθρώπινη συμπεριφορά.

Το δόγμα του επιστημονικού ντετερμινισμού καταπολεμήθηκε από πολλούς που αισθάνονταν ότι περιόριζε την ελευθερία του Θεού να παρεμβαίνει στον κόσμο, παρέμεινε όμως το βασικό αξίωμα της επιστήμης έως και τα πρώτα χρόνια του αιώνα μας. Μία από τις πρώτες ενδείξεις ότι η πεποίθηση αυτή πρέπει να εγκαταλειφθεί παρουσιάστηκε κατά τη μελέτη της ακτινοβολίας των θερμών σωμάτων, όπως τα άστρα. Σύμφωνα με ό,τι πίστευαν εκείνη την εποχή, ένα θερμό αντικείμενο έπρεπε να ακτινοβολεί στο περιβάλλον του την ίδια ποσότητα ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας σε όλες τις περιοχές συχνοτήτων. Επειδή όμως οι περιοχές συχνοτήτων είναι άπειρες, έπρεπε να είναι άπειρη και η συνολική ποσότητα ακτινοβολούμενης ενέργειας.





Το φως υψηλότερης συχνότητας διαταράσσει την ταχύτητα του σωματιδίου περισσότερο από ό,τι το φως χαμηλότερης συχνότητας.



### Παρατηρητής

Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος του φωτός που χρησιμοποιείται, για να παρατηρηθεί το σωματίδιο, τόσο μεγαλύτερη είναι η απροσδιοριστία της θέσης του, αλλά επίσης τόσο μεγαλύτερη είναι η βεβαιότητα όσον αφορά την ταχύτητά του.

Όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος του φωτός που χρησιμοποιείται, για να παρατηρηθεί το σωματίδιο, τόσο μεγαλύτερη είναι η βεβαιότητα της θέσης του, αλλά επίσης τόσο μεγαλύτερη είναι η απροσδιοριστία όσον αφορά την ταχύτητά του.

Για να αποφύγει αυτό το προφανώς μη αποδεκτό συμπέρασμα, ο Γερμανός φυσικός Max Planck υπέθεσε το 1900 ότι η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια εκπέμπεται κατά ασυνεχή ποσά, που ονομάστηκαν κβάντα. Επιπλέον κάθε κβάντο μεταφέρει ποσότητα ενέργειας που είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα των κυμάτων που εκπέμπονται. Άρα η εκπομπή ακτινοβολίας στις μεγάλες συχνότητες θα περιορίζεται, αφού εκεί η εκπομπή ενός κβάντου απαιτεί μεγαλύτερη ενέργεια από όση είναι διαθέσιμη. Έτσι το συνολικό ποσό ενέργειας που εκπέμπεται θα ήταν περιορισμένο και όχι άπειρο.

Οι επιπτώσεις της θεωρίας των κβάντων για το δόγμα του ντετερμινισμού δεν κατανοήθηκαν παρά μόνο το 1926, όταν ένας άλλος Γερμανός φυσικός, ο Werner Heisenberg (Χάισενμπεργκ), διατύπωσε την περίφημη αρχή του, την αρχή της απροσδιοριστίας.

Για να μπορέσουμε να προβλέψουμε τη μελλοντική θέση και ταχύτητα ενός σωματιδίου, πρέπει να μπορούμε να μετρήσουμε επακριβώς την τωρινή του θέση και ταχύτητα. Ο προφανής τρόπος, για να πετύχουμε κάτι τέτοιο, είναι να φωτίσουμε το σωματίδιο. Κάποια από τα κύματα του φωτός θα ανακλαστούν πάνω του και θα υποδείξουν το σημείο όπου βρίσκεται. Δε θα μπορούμε όμως να προσδιορίσουμε τη θέση του με μεγαλύτερη ακρίβεια από την απόσταση μεταξύ των κορυφών των κυμάτων του φωτός που χρησιμοποιούμε. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι, για να μετρήσουμε με πολύ μεγάλη ακρίβεια τη θέση ενός σωματιδίου, χρειαζόμαστε φως με πολύ μικρό μήκος κύματος. Αλλά από την υπόθεση των κβάντων του Planck προκύπτει ότι δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε οσοδήποτε μικρή ποσότητα φωτός. Πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τουλάχιστον ένα κβάντο.

Αυτό το κβάντο θα προκαλέσει μια απρόβλεπτη διαταραχή στη θέση και στην ταχύτητα του σωματιδίου. Επιπλέον όσο μεγαλύτερη είναι η απαιτούμενη ακρίβεια μέτρησης της θέσης του σωματιδίου τόσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος του φωτός που χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε, και τόσο μεγαλύτερη η ενέργεια του κβάντου. Έτσι η ταχύτητα του σωματιδίου θα υποστεί ακόμη μεγαλύτερη διαταραχή.

Με άλλα λόγια, όσο πιο μεγάλη είναι η ακρίβεια με την οποία προσπαθούμε να μετρήσουμε τη θέση του σωματιδίου τόσο πιο μικρή είναι η ακρίβεια με την οποία μπορούμε να μετρήσουμε την ταχύτητά του και αντίστροφα. Ο Heisenberg έδειξε ότι, αν πολλαπλασιάσουμε την απροσδιοριστία στη θέση του σωματιδίου επί την απροσδιοριστία στην ταχύτητά του, επί τη μάζα του, θα έχουμε έναν αριθμό που δεν μπορεί ποτέ να γίνει πιο μικρός από ορισμένη ποσότητα, τη λεγόμενη σταθερά του Planck.

Η αρχή της απροσδιοριστίας του Heisenberg είναι θεμελιώδης χαρακτηριστική ιδιότητα του κόσμου. Η αρχή της απροσδιοριστίας είχε βαθιά επίπτωση στην εικόνα του ανθρώπου για τον κόσμο. Αν και πέρασαν περισσότερα από πενήντα χρόνια, αυτή η επίπτωση δεν έχει κατανοηθεί εντελώς από πολλούς φιλοσόφους και εξακολουθεί να αποτελεί αντικείμενο διαμάχης.

Η αρχή της απροσδιοριστίας σήμανε το τέλος του ονείρου του Laplace για μία θεωρία της Φυσικής και ένα μοντέλο του Σύμπαντος που θα ήταν απόλυτα ντετερμινιστικά. Η νέα θεωρία, που βασίστηκε στην αρχή της απροσδιοριστίας, ονομάστηκε κβαντική μηχανική. Σύμφωνα με τη νέα θεωρία, ένα σωματίδιο δεν έχει μία θέση και μία ταχύτητα διαχωρισμένες μεταξύ τους, καλά ορισμένες και παρατηρήσιμες. Αντί γι' αυτές περιγράφεται με μία συνάρτηση της θέσης και της ταχύτητάς του, που λέγεται κυματοσυνάρτηση. Η

κυματοσυνάρτηση μας μιλά μόνο για τις πιθανότητες να έχει το σωματίδιο διάφορες τιμές θέσης και ταχύτητας.

Η κβαντική μηχανική δεν προβλέπει για ένα πείραμα ένα μοναδικά καθορισμένο αποτέλεσμα, αλλά ένα πλήθος διαφορετικών πιθανών αποτελεσμάτων και μας πληροφορεί για το πόσο πιθανό είναι το καθένα τους. Η κβαντική μηχανική εισάγει λοιπόν στην επιστήμη ένα αναπόφευκτο στοιχείο αδυναμίας πρόβλεψης και τυχαίου.

Απόσπασμα από το βιβλίο  
Το χρονικό του χρόνου του Stephen Hawking  
(Στέφαν Χόκινγκ).



**Βάσει του ν. 3966/2011 τα διδακτικά βιβλία του Δημοτικού, του Γυμνασίου, του Λυκείου, των ΕΠΑ.Λ. και των ΕΠΑ.Σ. τυπώνονται από το ΙΤΥΕ - ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ και διανέμονται δωρεάν στα Δημόσια Σχολεία. Τα βιβλία μπορεί να διατίθενται προς πώληση, όταν φέρουν στη δεξιά κάτω γωνία του εμπροσθόφυλλου ένδειξη «ΔΙΑΤΙΘΕΤΑΙ ΜΕ ΤΙΜΗ ΠΩΛΗΣΗΣ». Κάθε αντίτυπο που διατίθεται προς πώληση και δεν φέρει την παραπάνω ένδειξη θεωρείται κλεψίτυπο και ο παραβάτης διώκεται σύμφωνα με τις διατάξεις του άρθρου 7 του Νόμου 1129 της 15/21 Μαρτίου 1946 (ΦΕΚ 1946, 108, Α').**

**Απαγορεύεται η αναπαραγωγή οποιουδήποτε τμήματος αυτού του βιβλίου, που καλύπτεται από δικαιώματα (copyright), ή η χρήση του σε οποιαδήποτε μορφή, χωρίς τη γραπτή άδεια του Υπουργείου Παιδείας, Διά Βίου Μάθησης και Θρησκευμάτων / ΙΤΥΕ - ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ.**