

Τι είναι το φως, σωματίο ή κύμα;

1.1 Η ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Από πολύ παλιά, στους αρχαιότετους χρόνους, φιλόσοφοι και φυσιοδίφες προσπαθούσαν να κατανοήσουν και να ερμηνεύσουν τη «φύση» του φωτός. Για πολλά χρόνια ήταν αντικείμενο μακρόπνοων 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).

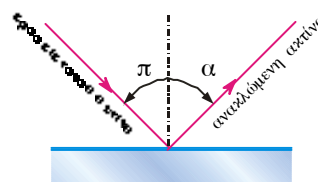
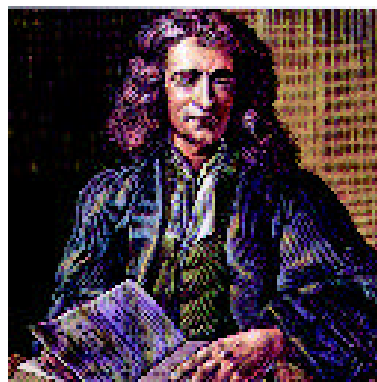
Πρώτοι οι αρχαίοι Έλληνες είχαν αντιληφθεί και διατυπώσει αυτό που εμείς σήμερα ονομάζουμε «σωματιδιακή φύση» του φωτός. Πίστευαν δηλαδή ότι το φως που εκπέμπει ο Ήλιος, αλλά και κάθε φωτοβόλουσα πηγή, αποτελείται από μικρά σωματίδια τα οποία κινούνται με πολύ μεγάλη ταχύτητα και, όταν πέφτουν στο μάτι 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 την αρχή διατήρησης της ενέργειας και της ορμής, το νόμο της ανάκλασης του φωτός, δηλαδή:

$$\text{γωνία πρόσπτωσης } (\pi) = \text{γωνία ανάκλασης } (\alpha)$$

Δύο σημαντικά φαινόμενα, η περίθλαση και η συμβολή του φωτός, απασχόλησαν τους φυσικούς Christian Huygens (Κρίστιαν Χόυνγκενς, 1629-1695) και Tomas Young (Τόμας Γιανγκ, 1773-1829)

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.





James Clerk Maxwell

Το φως είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

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.

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 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.

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

Η κυματική φύση του φωτός.

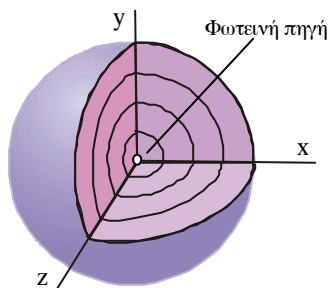
Ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell

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.**

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

Οι συνηθισμένες πηγές ορατού φωτός δίνουν τέτοιες συχνότητες (ή μήκη κύματος) ηλεκτρομαγνητικών 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,



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

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. Επειδή το φως έχει πολύ μεγάλη συχνότητα, την εποχή εκείνη ήταν αδύνατο να δημιουργηθούν τεχνητά υψίσυχνες ταλαντώσεις σε ηλεκτρικά κυκλώματα.

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

$$c = \lambda \cdot f \quad \text{Θεμελιώδης εξίσωση της κυματικής} \quad (1.1)$$

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.

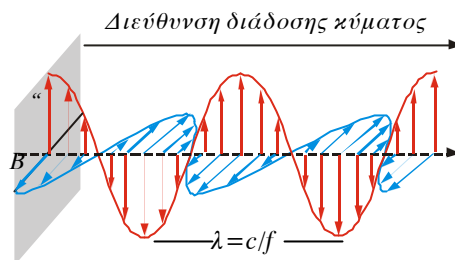
Το 1900 ο Planck, για να ερμηνεύσει την ακτινοβολία που παράγει ένα θερμαινόμενο σώμα, εισήγαγε τη θεωρία των **κβάντα φωτός**, την οποία εφάρμοσε αργότερα ο Einstein, για να ερμηνεύσει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

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 .

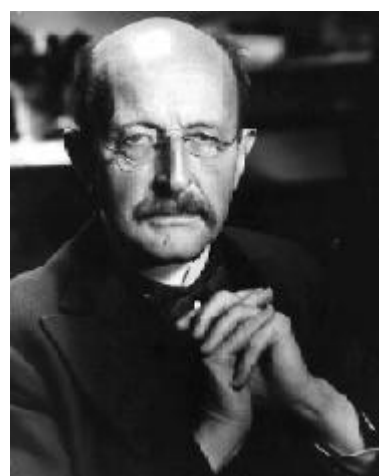
Όταν το φως προσπίπτει πάνω στην ύλη, τα άτομα της ύλης απορροφούν την ακτινοβολία ασυνεχώς, που σημαίνει ότι κάθε άτομο απορροφά μεμονωμένα φωτόνια. Κάθε φωτόνιο μιας ακτινοβολίας έχει ενέργεια που δίνεται από τη σχέση $E = hf$.

$$E = h \cdot f \quad \text{Ενέργεια φωτονίου} \quad (1.2)$$

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.



1-2 Στιγμιότυπο ηλεκτρομαγνητικού κύματος μακριά από την πηγή, που διαδίδεται οριζόντια. Οι εντάσεις E και B των πεδίων είναι κάθετες στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος και γι' αυτό τα κύματα αυτά ονομάζονται εγκάρσια.



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**

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 οποιεσδήποτε τιμές, αλλά μόνο ακέραια πολλαπλάσια της τιμής του φορτίου ηλεκτρονίου: $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

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 συχνότητά του, που είναι κατ' εξοχήν κυματική ιδιότητα.

1.2 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 του πρώτου.

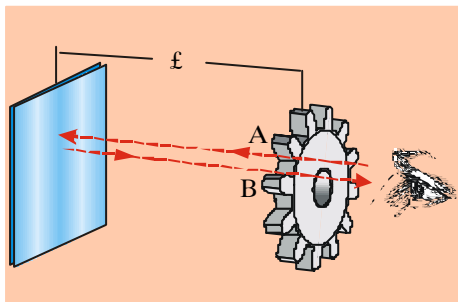
Αν λοιπόν μετρούσε κανείς το χρόνο που περνούσε από τη στιγμή που ο πρώτος άνοιγε το παραθυράκι έως τη στιγμή που έβλεπε το φως του δεύτερου παρατηρητή (και με γνωστή τη μεταξύ τους απόσταση), με μια απλή διαίρεση θα μπορούσε να μετρήσει την ταχύτητα του φωτός. Όμως ο χρόνος αντίδρασης των δύο παρατηρητών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

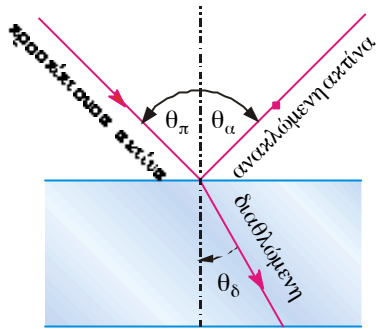
Το 1849 ο H.L. Fizeau (Φιζό), ένας Γάλλος φυσικός, κατάφερε να μετρήσει την ταχύτητα του φωτός με απλά μηχανικά μέσα. Στο διπλανό σχήμα παριστάνεται μια απλουστευμένη μορφή της διάταξης που χρησιμοποίησε. Η βασική ιδέα της μεθόδου ήταν να μετρηθεί ο χρόνος που χρειάζεται το φως, για να διανύσει την απόσταση «πήγαινε - έλα» μεταξύ μιας φωτεινής πηγής Π και ενός κατόπτρου K_1 , που βρισκόταν σε μεγάλη απόσταση από την πηγή (σχήμα 1-3).

Η ακτίνα που προέρχεται από τη φωτεινή πηγή Π ανακλάται στο «ημιεπαργυρωμένο κάτοπτρο» K_2 και, αφού διανύσει την απόσταση ℓ , προσπίπτει στο κάτοπτρο K_1 . Η ανακλώμενη ακτίνα επιστρέφει από την ίδια διαδρομή, μεταφέροντας το είδωλο της πηγής Π, οπότε γίνεται αντιληπτή από κάποιο παρατηρητή που βρίσκεται πίσω από το K_2 . Μεταξύ του παρατηρητή και του κατόπτρου K_1 παρεμβάλλεται οδοντωτός τροχός Τ, ο οποίος περιστρέφεται με τέτοιο τρόπο, ώστε άλλοτε η ακτίνα φωτός 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.



1.3 ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ

Ανάκλαση και διάθλαση του φωτός

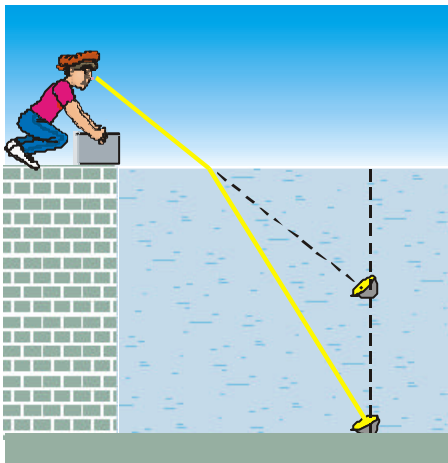


1-4α Ανάκλαση και διάθλαση από οπτικά αραιότερο σε οπτικά πικνότερο μέσο. θ_π είναι η γωνία πρόσπτωσης, θ_δ η γωνία διάθλασης και θ_α η γωνία ανάκλασης. Ισχύει: $\theta_\delta < \theta_\pi$.

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 1-4α βλέπουμε πώς ανακλώνται οι ακτίνες, όταν προσπίπτουν σε μια λεία επιφάνεια, για παράδειγμα από τον αέρα στην επιφάνεια ενός γυαλιού. Η προσπίπτουσα και η ανακλώμενη ακτίνα σχηματίζουν, στο σημείο ανάκλασης, γωνίες θ_π και θ_α , 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 1-4α), ενώ, όταν εισέρχονται από το γυαλί στον αέρα, απομακρύνονται από την κάθετο.

Στο πείραμα του σχήματος 1-4β βλέπουμε ότι οι ακτίνες φωτός 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.



1-4β Το φως, κατά τη διάδοσή 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 φωτός.

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 $c_0 = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$. 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 του φωτός στο κενό προς την ταχύτητα c μέσα σε κάποιο υλικό και ονομάζεται **δείκτης διάθλασης** n του υλικού μέσου. Ισχύει δηλαδή:

$$n = \frac{\text{ταχύτητα στο κενό}}{\text{ταχύτητα στο μέσο}} = \frac{c_0}{c} \quad (1.4)$$

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

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (1.5)$$

Η τελευταία σχέση μάς πληροφορεί ότι φως με μήκος κύματος λ_0 στο κενό υφίσταται μεταβολή του μήκους κύματός 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 1.5 για τα δύο οπτικά μέσα, έχουμε:

$$\lambda_{F1} = \frac{\lambda_0}{n_1} \quad (1) \quad \text{και} \quad \lambda_{F2} = \frac{\lambda_0}{n_2} \quad (2)$$

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

$$\frac{\lambda_{F1}}{\lambda_{F2}} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{και, επειδή } n_2 > n_1, \text{ προκύπτει } \lambda_{F1} > \lambda_{F2}$$

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.

Επειδή για το κενό είναι εξ ορισμού $n=1$, γίνεται κατανοητό ότι το μήκος κύματος θα έχει τη μεγαλύτερη τιμή λ_0 στο κενό. Ως μονάδα μέτρησης του μήκους κύματος για το ορατό φως χρησιμοποιείται το υποπολλαπλάσιο του 1m, που είναι το 1nanometre ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$).

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

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 λ_0 . Άρα:

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

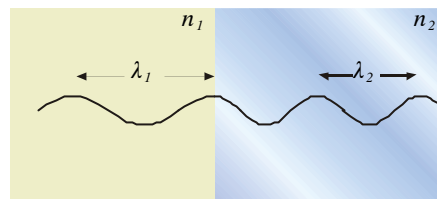
Βλέποντας τον πίνακα 1.1 διαπιστώνουμε ότι ο δείκτης διάθλασης n έχει περίπου την ίδια τιμή με το νερό.

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:

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

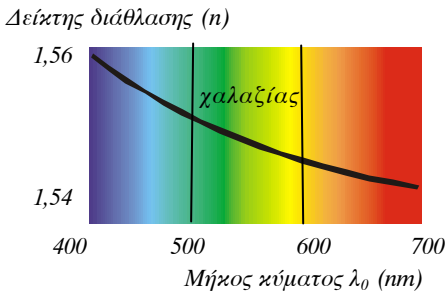


1-4γ Εικόνα που δείχνει τη μείωση του μήκους κύματος, όταν το φως διέρχεται από οπτικά αραιότερο σε οπτικά πυκνότερο μέσο. Ισχύει στην περίπτωση αυτή $n_2 > n_1$ και $\lambda_2 < \lambda_1$. Το οπτικά πυκνότερο μέσο είναι αυτό που έχει το μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης.

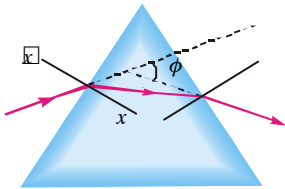
Πίνακας 1.1. Δείκτες διάθλασης διάφορων υλικών που έχουν υπολογιστεί με φως μήκους κύματος $\lambda_0=589\text{nm}$ (κίτρινο χρώμα του νατρίου στο κενό)

Υλικό	Δείκτης διάθλασης
Αέρια (0°C, 1Atm)	
Αέρας	1,000293
Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	1,00045
Στερεά	
Πάγος (H ₂ O)	1,309
Ορυκτό άλας (NaCl)	1,544
Χαλαζίας (SiO ₂)	1,544
Φθορίτης (CaF ₂)	1,434
Ορυκτό ζιρκόνιο (ZrO ₂ · SiO ₂)	1,923
Αδάμας (C)	2,417
Υαλοι (τυπικές τιμές)	1,5 - 1,9
Υγρά σε θερμοκρασία 20°C	
Μεθανόλη (CH ₃ OH)	1,329
Νερό (H ₂ O)	1,333
Αιθανόλη (C ₂ H ₅ OH)	1,360
Τετραχλωράνθρακας (CCl ₄)	1,460
Γλυκερίνη	1,473
Βενζόλιο	1,501

1.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΥΚΟΥ ΦΩΤΟΣ ΚΑΙ ΧΡΩΜΑΤΑ

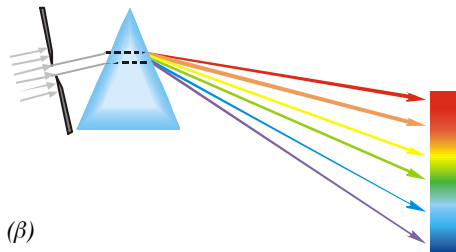


1-5 Εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος.



1-6 Ακτίνα φωτός που διαθλάται από πρίσμα εκτρέπεται κατά γωνία ϕ .

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.



1-7 (α) Απεικόνιση του διασκεδασμού που προκαλείται σε δέσμη λευκού φωτός από ένα πρίσμα. Η ταινία των εξερχόμενων χρωμάτων ονομάζεται φάσμα. (β) Τα βασικά χρώματα του φάσματος.

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.

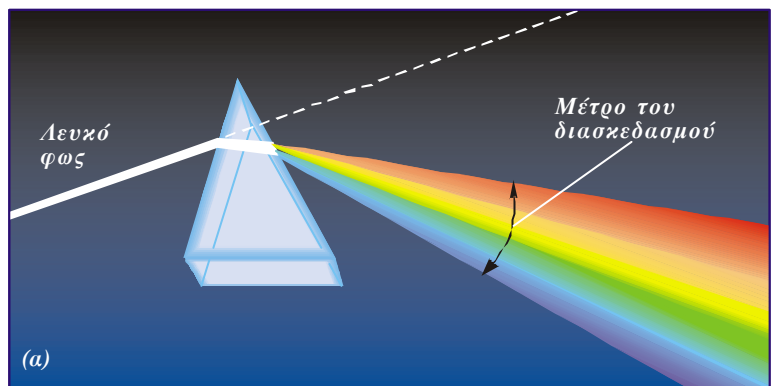
Το φαινόμενο αυτό, δηλαδή η **εξάρτηση της ταχύτητας του φωτός και του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος, ονομάζεται διασκεδασμός**. Στο σχήμα 1-5 απεικονίζεται η εξάρτηση του δείκτη διάθλασης ενός οπτικού υλικού (χαλαζιά) από το μήκος κύματος λ_0 στο κενό. Η τιμή του n , όπως βλέπουμε, μειώνεται, 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 1-6 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 $x\chi$, 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 ϕ . Η γωνία ϕ ονομάζεται **γωνία εκτροπής**.

Έστω τώρα ότι έχουμε μία δέσμη λευκού φωτός που προσπίπτει πάνω σε ένα πρίσμα (σχήμα 1-7α). 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**.

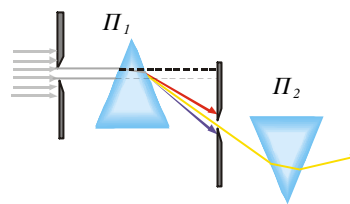
Τα χρώματα του φάσματος, κατά σειρά μείωσης του μήκους κύματος, είναι: ερυθρό, πορτοκαλί, κίτρινο, πράσινο, κυανό και ιώδες (σχήμα 1-7β). Τα χρώματα αυτά δεν αναλύονται σε άλλα απλούστερα και, αν τα ανασυνθέσουμε, θα αναπαράγουμε το λευκό φως.



Παρατηρώντας την εικόνα του σχήματος 1-7β 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.

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 1.2).
- 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.



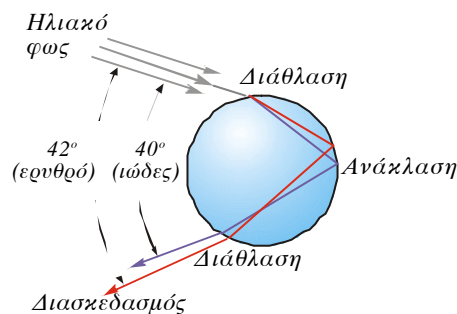
1-8 Το μονοχρωματικό φως δεν αναλύεται σε άλλες απλούστερες ακτινοβολίες. Το πρίσμα Π₁ αναλύει το λευκό φως, όμως το Π₂ απλώς εκτρέπει την κίτρινη ακτίνα.

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

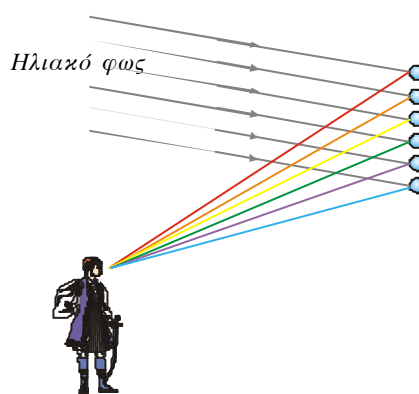
Ουράνιο τόξο - Τα χρώματα της φύσης

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.

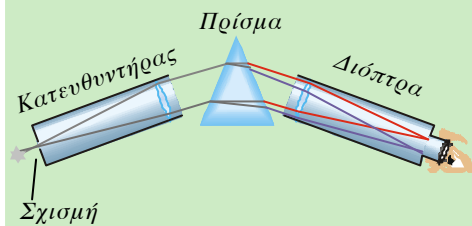
Ο διασκεδασμός προκαλεί τη διάθλαση των χρωμάτων σε διαφορετικές γωνίες και έτσι έχουμε την ανάλυση του φωτός στα χρώματα της ίριδας.



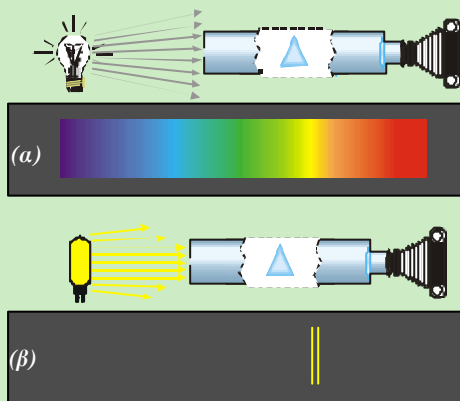
1-9 Διάθλαση ηλιακού φωτός σε σταγόνα βροχής.



1-10 Η Ισμήνη με το Φαίδωνα στο Μυστρά με φόντο το ουράνιο τόξο και την κοιλάδα του Ευρώτα.



1-11 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 προσφθάλμιο σύστημα της διόπτρας.



1-12 Φάσματα εκπομπής που αποτυπώνονται στο φιλμ του φασματογράφου: (α) λαμπτήρα πυρακτώσεως, (β) λαμπτήρα νατρίου.

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.

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.

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 κτλ.

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, λόγω 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).

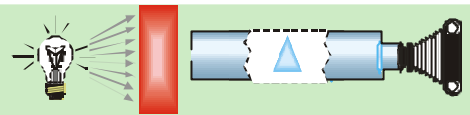
Φάσματα απορρόφησης

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

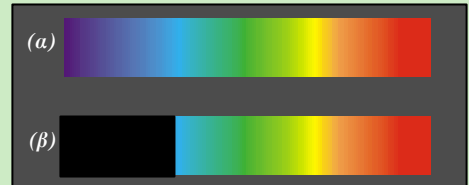
τους εμφανίζονται σκοτεινές περιοχές. Τα φάσματα αυτά τα ονομάζουμε **φάσματα απορρόφησης**, γιατί οι σκοτεινές περιοχές οφείλονται στο ότι οι ακτίνες ορισμένων χρωμάτων έχουν απορροφηθεί κατά τη διέλευσή τους από το υλικό μέσο. Τα φάσματα απορρόφησης τα διακρίνουμε σε **συνεχή** και **γραμμικά**.

(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).

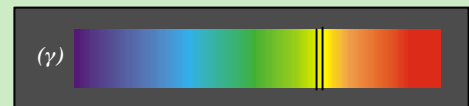
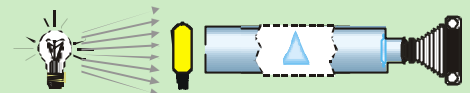
(β) **Γραμμικά φάσματα απορρόφησης** δίνουν τα αέρια ή οι ατμοί. Αποτελούνται από ένα συνεχές φάσμα στο οποίο υπάρχουν σκοτεινές γραμμές. Έτσι, αν μεταξύ μίας φωτεινής πηγής που εκπέμπει λευκό φως και του κατευθυντήρα ενός φασματογράφου παρεμβάλουμε ένα διαφανές δοχείο με ατμούς νατρίου (σχήμα 1-13γ), 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.



1-13 Τυπική διάταξη για την αποτύπωση του φάσματος απορρόφησης. Το κόκκινο γυαλί επιτρέπει τη διέλευση ακτίνων με μήκη κύματος κοντά στην περιοχή του ερυθρού.



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



(γ) Γραμμικό φάσμα απορρόφησης ατμών Na.

Υπεριώδης και υπέρυθη ακτινοβολία

Υπεριώδης ακτινοβολία

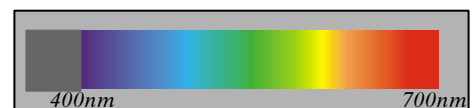
Το συνεχές φάσμα που παίρνουμε, όταν αναλύουμε με το φασματοσκόπιο το λευκό φως, τελειώνει στο ένα άκρο με ιώδες φως, ενώ στο άλλο με ερυθρό. Όπως φαίνεται από το σχήμα 1-14, το ορατό φως, δηλαδή τα μήκη κύματος που αντιλαμβάνεται το μάτι μας, έχει όρια και τα χρώματά του έχουν μήκη κύματος που κυμαίνονται 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.

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.

Αν και η υπεριώδης ακτινοβολία δεν είναι ορατή με γυμνό μάτι, μερικές από τις ιδιότητές 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.



1-14 Φάσμα υπεριώδους - γκριζα περιοχή στο φιλμ πέρα από το ιώδες.



(α) (β)

1-15 Δύο φωτογραφίες του ίδιου αγαλματιδίου τραβηγμένες η (α) στο ορατό φως και η (β) στο υπεριώδες.



1-16 Η φωτογραφία έχει ληφθεί με φίλμ ευπαθές στο υπέρυθρο φως. Η αντίστοιχη του ορατού φωτός δεν ήταν δυνατό να ληφθεί, γιατί τη στιγμή της λήψης επικρατούσε σκοτάδι.



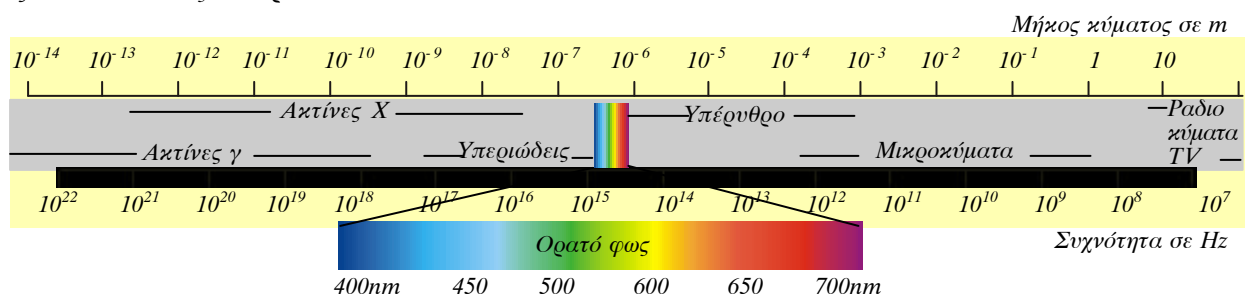
(α)



(β)

1-17 Δύο φωτογραφίες του ίδιου τοπίου. Η (α) έχει ληφθεί με φίλμ του εμπορίου, ενώ η (β) με φίλμ ευπαθές στην υπέρυθη ακτινοβολία και μετά από χρήση φίλτρων που επιτρέπει μόνο τη διέλευση υπέρυθρου φωτός.

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



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

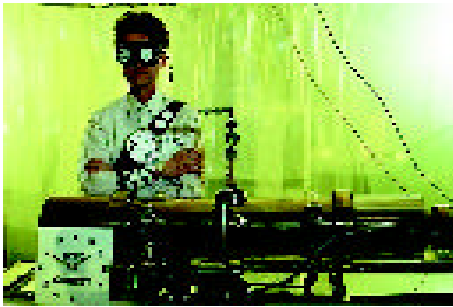
Αναλύοντας το λευκό φως ενός λαμπτήρα πυρακτώσεως πάνω σε πέτασμα παίρνουμε το φάσμα του. Αν τοποθετήσουμε ένα ευαίσθητο θερμόμετρο πάνω στο πέτασμα και το μετακινήσουμε από το ιώδες προς το ερυθρό, θα παρατηρήσουμε τη θερμοκρασία του να αυξάνεται. Πιο πέρα από το ερυθρό η ένδειξη είναι ακόμη μεγαλύτερη.

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**.

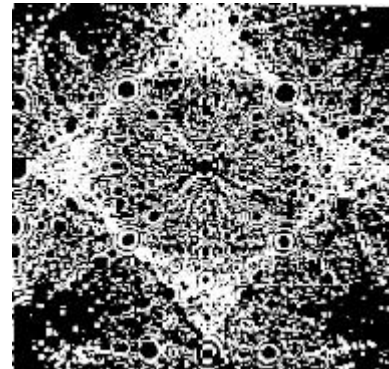
Επειδή η υπέρυθη ακτινοβολία είναι αόρατη, για την ανίχνευση της υπάρχουν ειδικά όργανα, **οι φορατές**. Η αρχή λειτουργίας των φορατών βασίζεται στην απορρόφηση ενέργειας των υπέρυθρων ακτινοβολιών και στη συνέχεια στη μετατροπή της σε άλλες μορφές. Οι υπέρυθρες ακτινοβολίες έχουν μήκη κύματος που κυμαίνονται μεταξύ 700nm και 10⁶nm. 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 εκλεκτικότητα τους να απορροφώνται από την ύλη. Στην Ιατρική, για παράδειγμα, δέση 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).



2-1 Ένας φύλακας του ατομικού ρολογιού και-
σίου στο Γραφείο Μέτρων και Σταθμών της
Ουάσιγκτον.



2-2 Άτομα στην επιφάνεια μιας μύτης
βελόνας όπως φαίνονται με ηλεκτρονι-
κό μικροσκόπιο πεδίου.

2.1 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 διαρουνται απειριόρι-στα και γι' αυτό ονομάστηκαν ά-τομα (δηλαδή άτμητα). Διατύπω-σαν λοιπόν μια φιλοσοφική θεωρία, για να ερμηνεύσουν τις ιδιότη-τες των υλικών σωμάτων. Υποστήριζαν ότι η ύλη αποτελείται από άτομα που διαφέρουν μεταξύ τους κατά το σχήμα και κατά το μέ-γεθος. Τα άτομα δε δημιουργούνται ούτε καταστρέφονται και επο-μένως 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 άτο-μα, ενώ αντίθετα η καταστροφή των σωμάτων οφείλεται στο δια-χωρισμό των ατόμων.

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 αντι-λήψεις 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 φιλοσοφι-κές θεωρίες των αρχαίων Ελλήνων. Δεν υπήρχε καμία πειραματι-κή παρατήρηση για την υποστήριξή της. Η θεωρία του Δημόκρι-του καταπολεμήθηκε από τον Πλάτωνα, τον Αριστοτέλη και τους μαθητές τους και έπεσε σε αφάνεια μέχρι το 19ο αιώνα.

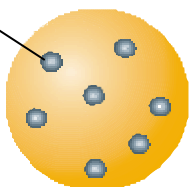


2-3 Δημόκριτος ο Αβδηρίτης (470-360 π.Χ.).
Αρχαίος Έλληνας φιλόσοφος, ιδρυτής της ατο-
μικής θεωρίας.

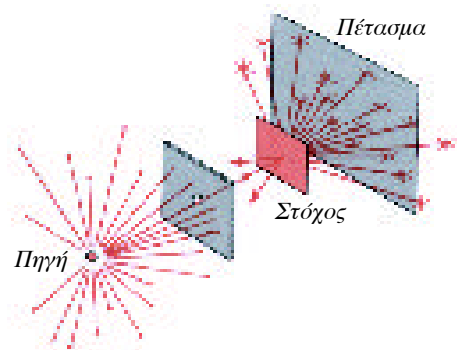


2-4 Αριστερά ο Άγγλος φυσικός J. J. Thomson (1856-1940) και δεξιά ο Ernest Rutherford (1871-1937).

Ηλεκτρόνιο



2-5 Το άτομο σύμφωνα με το πρότυπο του Thomson.



2-6 Πείραμα του Rutherford. Σκέδαση σωματίων α από ένα λεπτό φύλλο χρυσού. Περίπου ένα στα 8000 σωματίδια αποκλίνει κατά γωνία μεγαλύτερη των 90° . Τα σωματίδια α είναι πυρήνες ηλίου.

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.

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.

Πρότυπο του Rutherford

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:

- Το ολικό ηλεκτρικό φορτίο του ατόμου είναι μηδέν και επομένως δεν ασκείται ηλεκτρική δύναμη στα σωματίδια α , όσο αυτά βρίσκονται στο εξωτερικό του ατόμου.
- Επειδή το θετικό ηλεκτρικό φορτίο είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο, δεν μπορεί να ασκεί σημαντική απωστική δύναμη στα σωματίδια α , όσο αυτά βρίσκονται στο εσωτερικό του ατόμου.
- Η σύγκρουση των σωματίων α με τα 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 σωματίδια 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° .** Αυτό μπορεί να συμβεί μόνο, αν το θετικό φορτίο είναι συγκεντρωμένο σε μικρό

χώρο, ώστε να ασκεί στα σωματίδια α μεγάλες αποσπαστικές ηλεκτρικές δυνάμεις.

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

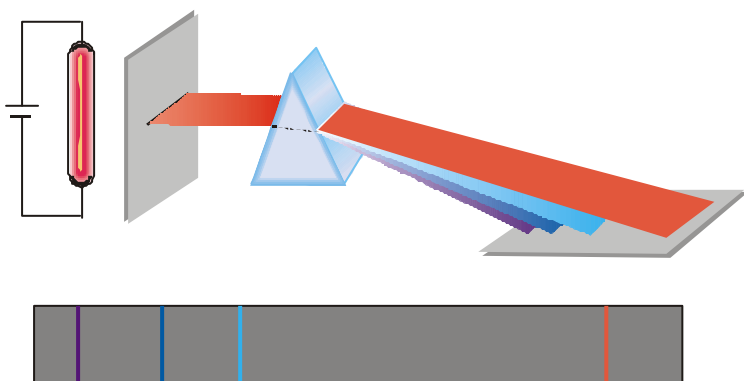
Το άτομο αποτελείται από μία πολύ μικρή περιοχή στην οποία είναι συγκεντρωμένο όλο το θετικό φορτίο και σχεδόν όλη η μάζα του ατόμου. Η περιοχή αυτή ονομάζεται πυρήνας. Ο πυρήνας περιβάλλεται από ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια πρέπει να κινούνται γύρω από τον πυρήνα σε κυκλικές τροχιές, όπως οι πλανήτες γύρω 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.

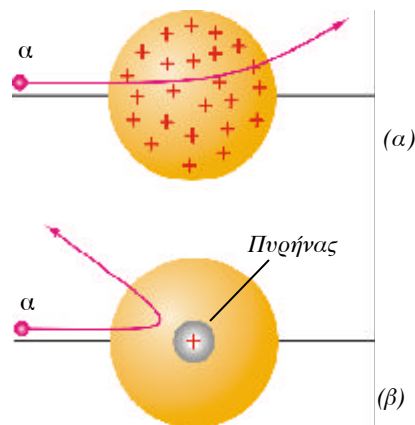
Ατομικά φάσματα

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.

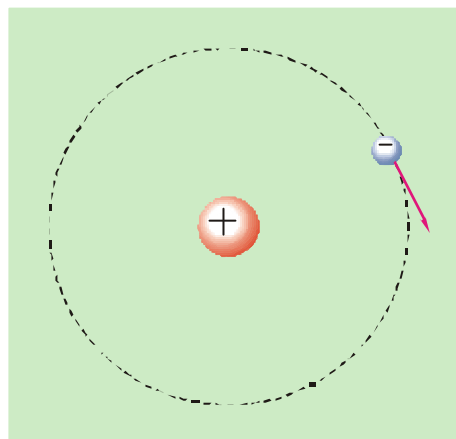
Τα μήκη κύματος που περιέχει το γραμμικό φάσμα εκπομπής είναι χαρακτηριστικά του στοιχείου που εκπέμπει το φως. Δεν υπάρχουν δύο διαφορετικά στοιχεία που να έχουν το ίδιο φάσμα εκπομπής. Το δεδομένο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των στοιχείων που περιέχονται σε μια ουσία. Δηλαδή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



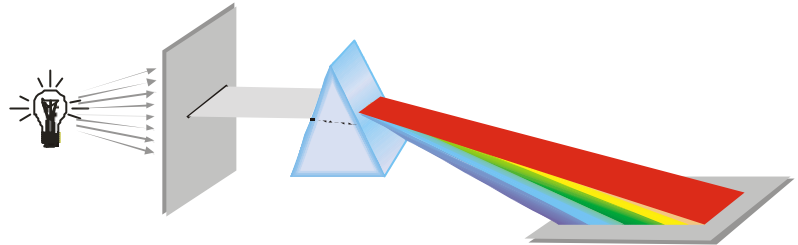
2-7 (α) Τα σωματίδια α αποκλίνουν κατά μικρή γωνία σύμφωνα με το πρότυπο του Thomson. (β) Τα σωματίδια α αποκλίνουν κατά μεγάλη γωνία σύμφωνα με το πρότυπο του Rutherford.



2-8 Μοντέλο του Rutherford για το άτομο (πλανητικό μοντέλο).

2-9 Γραμμικό φάσμα εκπομπής του υδρογόνου. Το φως που εκπέμπει το αέριο περνάει μέσα από ένα πρίσμα και το φάσμα αποτυπώνεται σε ευαίσθητο φιλμ.

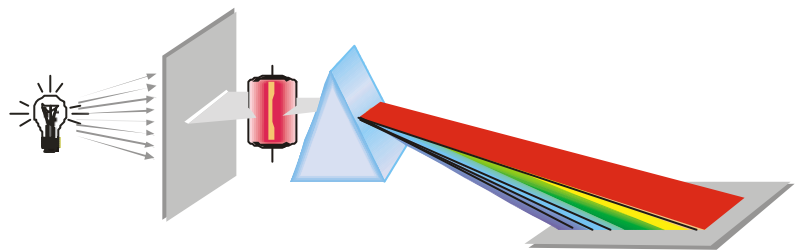
Ένα αέριο μπορεί όχι μόνο να εκπέμπει φως, αλλά μπορεί και να απορροφά φως. Αν φωτίσουμε με πηγή που εκπέμπει λευκό φως ένα πρίσμα, πίσω από το οποίο έχει τοποθετηθεί πέτασμα, τότε θα παρατηρήσουμε πάνω στο πέτασμα μια συνεχή χρωματιστή ταινία. Η ταινία αυτή των χρωμάτων, όπως γνωρίζουμε, ονομάζεται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



2-10 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.



2-11 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 μία 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 παρακάτω 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.

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

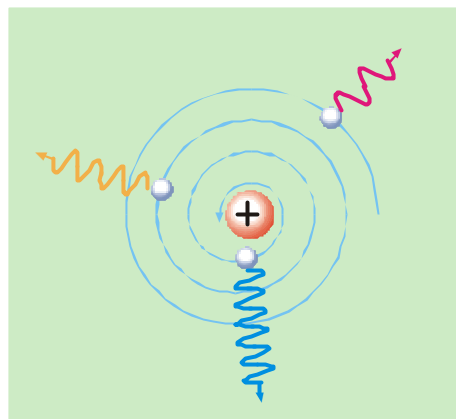
Στις αρχές του 20ού αιώνα οι επιστήμονες διαπίστωσαν ότι η κλασική Φυσική αδυνατούσε να ερμηνεύσει τα γραμμικά φάσματα των αερίων. Δεν μπορούσε να εξηγήσει:

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

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 $h = h/2\pi$, όπου h είναι η σταθερά του Plank. Το μέτρο της στροφορμής του ηλεκτρονίου δίνεται από την εξίσωση:

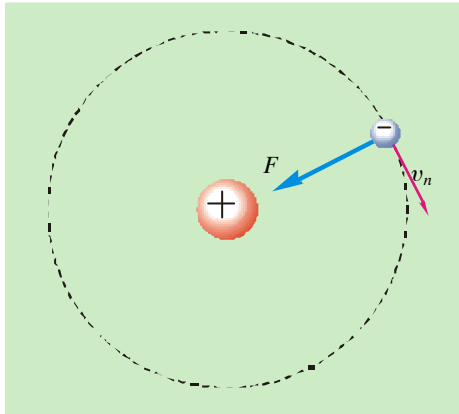
$$L = mvr$$



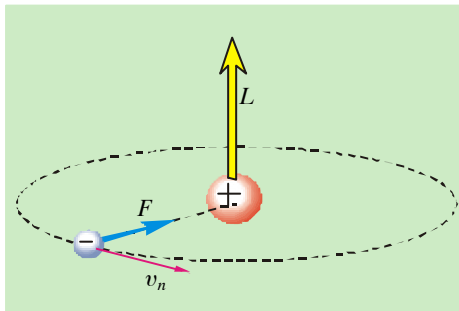
2-12 Ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο του ατόμου. Σύμφωνα με την κλασική Φυσική, το επιταχυνόμενο ηλεκτρόνιο έπρεπε να εκπέμπει συνεχές φάσμα και ακολουθώντας σπειροειδή τροχιά να πέφτει στον πυρήνα.



2-13 Ο Δανός φυσικός Niels Bohr (1885-1962). Τιμήθηκε με το βραβείο Nobel Φυσικής το 1922 για την έρευνά του στη δομή των ατόμων.



2-14 *Άτομο του υδρογόνου.* 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: $m \delta r = n \hbar$



2-14a Το διάνυσμα της στροφορμής L του ηλεκτρονίου στο πρότυπο του Bohr.

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 :

$$m v r = n \frac{h}{2\pi} = n \hbar, \quad n=1, 2, 3, \dots, - \quad (2.1)$$

- 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 διαγράφει 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_i είναι η ενέργεια του ατόμου πριν από τη μετάβαση, E_f η ενέργεια μετά τη μετάβαση και hf η ενέργεια του εκπεμπόμενου φωτονίου, τότε ισχύει:

$$E_i - E_f = hf \quad (2.2)$$

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 $F = ke^2/r^2$, που ασκεί ο πυρήνας στο ηλεκτρόνιο, πρέπει να είναι ίση με $F = m \alpha_\kappa$, όπου $\alpha_\kappa = v^2/r$ είναι η κεντρομόλος επιτάχυνση του ηλεκτρονίου:

$$F = m \alpha_\kappa \quad \text{ή} \quad k \frac{e^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \quad \text{ή} \quad v = e \sqrt{\frac{k}{m r}} \quad (1)$$

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

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

Η δυναμική ενέργεια του ηλεκτρονίου δίνεται από την εξίσωση:

$$U = -k \frac{e^2}{r} \quad (3)$$

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

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

$$E = -k \frac{e^2}{2r} \quad \text{Ολική ενέργεια ηλεκτρονίου} \quad (2.3)$$

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:

$$r_n = n^2 r_1 \quad \text{Επιτρεπόμενες τροχιές} \quad (2.4)$$

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

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

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:

$$E_n = \frac{E_1}{n^2} \quad \text{Επιτρεπόμενες τιμές ενέργειας} \quad (2.5)$$

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:

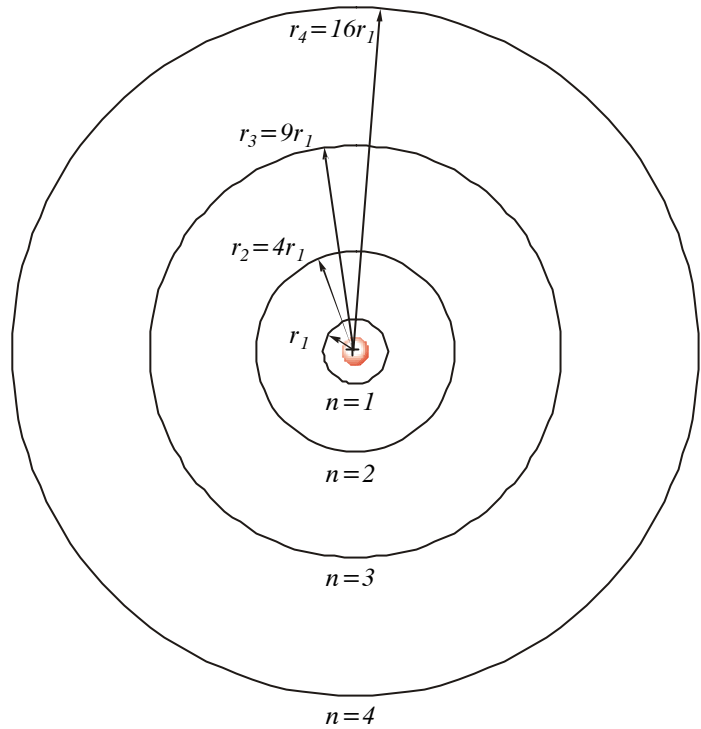
Κύριος κβαντικός αριθμός	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$...	$n \rightarrow \infty$
Ακτίνα	r_1	$4r_1$	$9r_1$...	∞
Ολική ενέργεια	E_1	$E_1/4$	$E_1/9$...	0

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

Το ηλεκτρονιοβόλτ (eV)

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

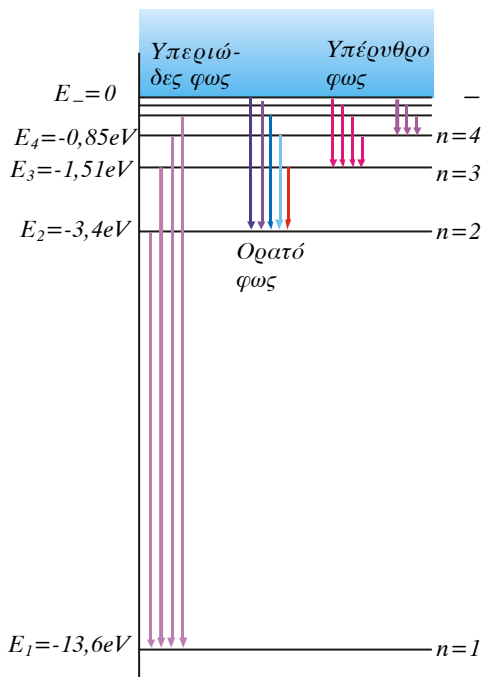
$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$



2.2 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**.



2-16 Διάγραμμα ενεργειακών σταθμών του ατόμου του υδρογόνου. Οι μεταβάσεις των ηλεκτρονίων από μία τροχιά σε άλλη συμβολίζονται με κατακόρυφα βέλη.

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**.

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 πραγματοποιεί.

Ιονισμός του ατόμου

Μερικές φορές το άτομο μπορεί να απορροφήσει τόσο μεγάλη ενέργεια, ώστε είναι δυνατό το ηλεκτρόνιό 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**.

Η ενέργεια ιονισμού είναι ίση με:

$$E_{\text{iov.}} = E_{-} - E_1$$

όπου $E_{-}=0$ είναι η ενέργεια του ατόμου που αντιστοιχεί σε κατάσταση με $n_{\psi} = \infty$ και E_1 η ενέργειά του στη θεμελιώδη κατάσταση. Επομένως:

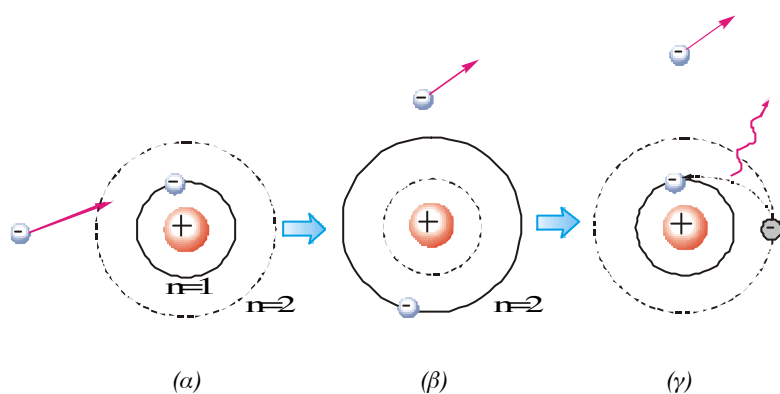
$$E_{\text{iov.}} = - E_1$$

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

2.3 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.



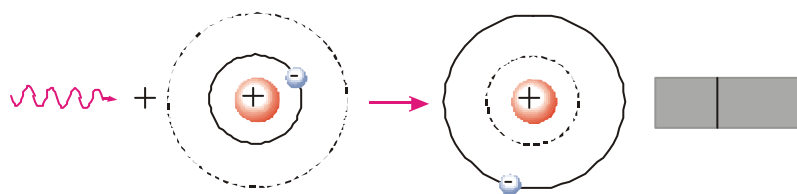
2-17 (α) Το άτομο του υδρογόνου στη θεμελιώδη κατάσταση πριν από την κρούση με το ηλεκτρόνιο.
(β) Το άτομο σε διεγερμένη κατάσταση.
(γ) Το άτομο επανέρχεται στη θεμελιώδη κατάσταση εκπέμποντας ένα φωτόνιο.

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 $n=2$.

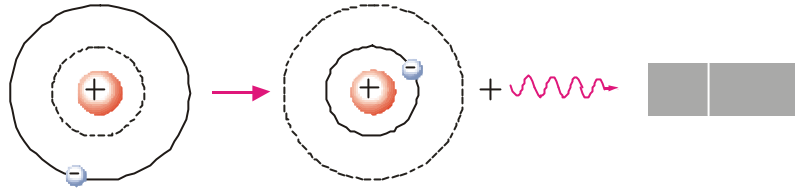
Μετά από ελάχιστο χρονικό διάστημα το διεγερμένο άτομο



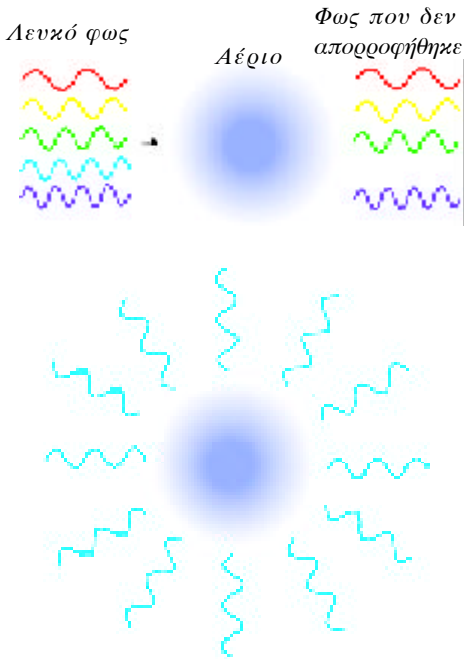
2-18 Εμφανεία του φάσματος απορρόφησης. Το άτομο απορροφά ένα φωτόνιο και μεταβαίνει από τη θεμελιώδη κατάσταση στην πρώτη διεγερμένη κατάσταση. Η σκοτεινή γραμμή του φάσματος απορρόφησης αντιστοιχεί στο μήκος κύματος του φωτονίου που απορροφήθηκε.

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 φω-

2-19 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.



τονίων είναι ίσες. Αυτός είναι ο λόγος που το φάσμα εκπομπής παρουσιάζει μία φωτεινή γραμμή στη θέση της σκοτεινής γραμμής του φάσματος απορρόφησης.



2-20 Το φως που απορροφήθηκε από το αέριο επανεκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις.

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 μεταπηδήσεις 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.

Η επιτυχία και η αποτυχία του προτύπου του Bohr

Σύμφωνα με το πρότυπο του Bohr, όταν το ηλεκτρόνιο του ατόμου του υδρογόνου μεταπηδήσει από αρχική τροχιά, που αντιστοιχεί σε κβαντικό αριθμό n_i , σε τελική τροχιά μικρότερης ενέργειας, που αντιστοιχεί σε κβαντικό αριθμό n_f , τότε εκπέμπεται ένα φωτόνιο συχνότητας f , για την οποία ισχύει:

$$E_i - E_f = hf \quad \text{ή} \quad f = \frac{E_i - E_f}{h} \quad (2.8)$$

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 άλλα άτομα ή ιόντα που έχουν μόνο ένα ηλεκτρόνιο στην εξωτερική τους στιβάδα. Τα άτομα αυτά λέγονται **υδρογονοειδή**. Όμως δεν μπορεί να ερμηνεύσει τα γραμμικά φάσματα των ατόμων που έχουν δύο ή περισσότερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική τους στιβάδα.

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.