



**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

Εργαστήριο Φυσικής III - Οπτική

Πέτρος Ρακιτζής

Τμήμα Φυσικής

8. ΜΕΛΕΤΗ ΑΤΟΜΙΚΩΝ ΦΑΣΜΑΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΗΣ

1. Σκοπός

Στο πείραμα αυτό θα μελετήσουμε ατομικά φάσματα εκπομπής προερχόμενα από διάφορα στοιχεία (Hg, Na, Th). Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιήσουμε ειδικές λάμπες που εμπεριέχουν τα αντίστοιχα στοιχεία, και έναν φασματογράφο οπτικής ίνας. Σκοπός του πειράματος είναι:

- Η εξοικείωση με σύγχρονες φασματοσκοπικές τεχνικές
- Εισαγωγή στις φυσικές διεργασίες που καθορίζουν τα χαρακτηριστικά των παρατηρούμενων φασμάτων εκπομπής

2. Θεωρία

Βασική προαπαιτούμενη γνώση

A. Serway, Physics for Scientists & Engineers, Τόμος IV, Σύγχρονη Φυσική, Κεφ. 40 & 42 (συμπεριλαμβανομένων των αντίστοιχων παραδειγμάτων και προβλημάτων).

B. Serway, Physics for Scientists & Engineers, Τόμος III, Κεφ.35.7 (ολική ανάκλαση, οπτικές ίνες)

Γ. Serway, Moses & Moyer, Σύγχρονη Φυσική, ΠΕΚ, Κεφ. 2, σελ. 47-63.

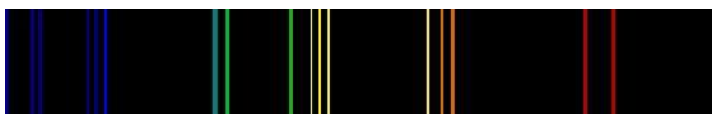
2.1 Εισαγωγικά

Η φασματοσκοπία τόσο ως θεωρητικό όσο και ως πειραματικό επιστημονικό πεδίο έχει συμβάλει πολύ σημαντικά στην κατανόηση της φύσης και στην θεμελίωση της κβαντομηχανικής. Έχει σημαντικές εφαρμογές σε πολλές επιστήμες (χημεία, βιολογία, ιατρική, αστρονομία, αλλά και στην βιομηχανία ως διαγνωστικό μέσο).

Το σύνολο των συχνοτήτων της ακτινοβολίας που εκπέμπει μία φωτεινή πηγή ονομάζεται **φάσμα** της πηγής αυτής.

Τα φάσματα εκπομπής των διαφόρων φωτεινών πηγών διακρίνονται σε συνεχή φάσματα και σε γραμμικά φάσματα.

Τα **γραμμικά φάσματα εκπομπής**, αποτελούνται από διακριτές έγχρωμες γραμμές, όπως φαίνεται στο παράδειγμα του σχήματος 1, και προέρχονται από την διέγερση αερίου ή ατμού. Τα γραμμικά φάσματα είναι χαρακτηριστικά του εκπέμποντος αερίου ή ατμού.



Σχήμα 1: Γραμμικό φάσμα εκπομπής. Το μήκος κύματος αυξάνεται και τα τη διεύθυνση του οριζόντιου άξονα.

Τα **συνεχή φάσματα εκπομπής**, όπως αυτό του σχήματος 2, εκπέμπονται από στερεά ή υγρά σώματα που βρίσκονται σε υψηλή θερμοκρασία (π.χ. λαμπτήρας πυρακτώσεως, βολταϊκό τόξο). Η κατανομή ενέργειας στις διάφορες περιοχές (μήκη κύματος) του συνεχούς φάσματος δίνεται από τον τύπο μέλανος σώματος του Planck και εξαρτάται από την θερμοκρασία του ακτινοβολούντος σώματος, και όχι από την χημική του σύσταση.



Σχήμα 2: Συνεχές φάσμα εκπομπής. Το μήκος κύματος αυξάνεται και τα τη διεύθυνση του οριζόντιου άξονα.

Όταν η θερμοκρασία είναι σχετικά χαμηλή (π.χ. ερυθροπωμένοι άνθρακες), το σώμα εκπέμπει κυρίως ερυθρή ακτινοβολία, ενώ για ακόμη χαμηλότερες θερμοκρασίες (π.χ. θερμοκρασία ανθρώπινου σώματος), εκπέμπεται υπέρυθη ακτινοβολία (βλ. συστήματα ασφαλείας με ανιχνευτές υπέρυθρης ακτινοβολίας).

2.2 Ατομικά (γραμμικά) φάσματα εκπομπής

Από την κβαντική θεωρία του ατόμου είναι γνωστό ότι τα άτομα έχουν συγκεκριμένες ενεργειακές στάθμες και ότι τα ηλεκτρόνια του ατόμου πληρούν τις κατώτερες ενεργειακές στάθμες με καθορισμένο τρόπο. Η ενεργειακή κατάσταση που καταλαμβάνεται από το ή τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στιβάδας είναι η κατάσταση ισορροπίας, ή, όπως λέμε στη γλώσσα των μεταπτώσεων, η χαμηλότερη ενεργειακά κατάσταση, I (lower energy level). Όπως έχει αποδειχθεί πειραματικά, είναι δυνατόν ένα ηλεκτρόνιο να διεγερθεί από την κατάσταση I σε μια άλλη ανώτερη u (upper). Η διέγερση αυτή μπορεί να γίνει με την απορρόφηση ενός φωτονίου, ή λόγω κρούσης με ένα άλλο ελεύθερα κινούμενο ηλεκτρόνιο, ή και με άλλους τρόπους.

Μετά την διέγερση, το άτομο μπορεί να επανέλθει στη βασική του χαμηλότερη ενεργειακά κατάσταση, με την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (φωτονίου), με ενέργεια

$$\Delta E_{ul} = h\nu_{ul} = E_u - E_l \quad (0)$$

όπου E_u και E_l είναι οι ενέργειες των επιπέδων που συμμετέχουν στην μετάπτωση.

Προφανώς, υπάρχουν πολλές δυνατές μεταβάσεις αυτού του είδους. Το σύνολο των συχνοτήτων (ή, ισοδύναμα, των μηκών κύματος) που εκπέμπονται από τα άτομα ενός στοιχείου αποτελεί το φάσμα εκπομπής του. Το φάσμα εκπομπής μπορεί να μελετηθεί με τη παρεμβολή ενός στοιχείου διασποράς, π.χ. πρίσματος ή φράγματος, που έχουν ήδη μελετηθεί σε προηγούμενες ασκήσεις.

Στις επόμενες παραγράφους θα περιγραφεί η διαδικασία εκπομπής ακτινοβολίας από ένα διεγερμένο άτομο, και θα αναλυθούν οι παράγοντες που καθορίζουν τελικά την κατανομή της εκπεμπόμενης έντασης της ακτινοβολίας συναρτήσει της συχνότητας, εκατέρωθεν της «κεντρικής» συχνότητας που προκύπτει από την σχέση (0).

Αποδιέγερση ενός μεμονωμένου ατόμου με εκπομπή ακτινοβολίας – αυθόρμητη εκπομπή

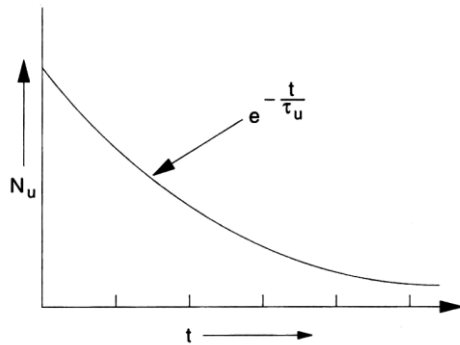
Ας θεωρήσουμε ότι ένα σύνολο ταυτόσημων ατόμων που αρχικά βρισκόταν στη βασική κατάσταση, διεγείρονται και μεταφέρονται γρήγορα στο επίπεδο u . Έστω ότι ο αριθμός ατόμων ανά μονάδα όγκου που βρίσκονται στην κατάσταση u είναι N_u . Πειραματικά έχει βρεθεί ότι η παραγόμενη ακτινοβολία από την μετάβαση u στην I , και επομένως και ο πληθυσμός N_u , αποσβένονται εκθετικά συναρτήσει του χρόνου (για την περίπτωση ενός μόνο κατώτερου επιπέδου I). Το Σχήμα 3α δείχνει την μεταβολή του N_u συναρτήσει του χρόνου, που χαρακτηρίζεται από ένα ενεργό χρόνο απόσβεσης τ_u . Το Σχήμα 3β δείχνει τα συμμετέχοντα ενεργειακά επίπεδα του ατόμου και τη χαρακτηριστική πιθανότητα της μετάπτωσης A_{ul} .

Όταν η πυκνότητα των ατόμων είναι χαμηλή και δεν έχουμε κρούσεις μεταξύ των ατόμων κατά τη διάρκεια της εκπομπής (της τάξης των μερικών τ_u), η εν λόγω εκπομπή ονομάζεται "αυθόρμητη εκπομπή" και η εκπεμπόμενη ενέργεια είναι $\Delta E_{ul} = E_u - E_l$.

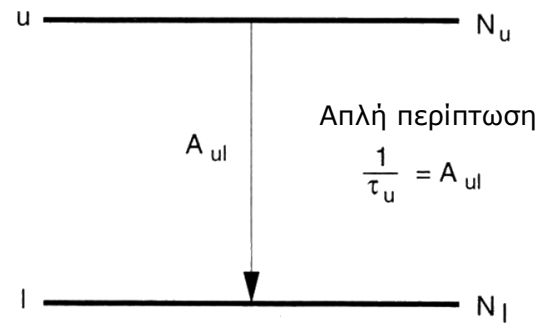
Μπορούμε να γράψουμε μια απλή εξίσωση για την χρονική μεταβολή του N_u :

$$\frac{dN_u}{dt} = -A_{ul} N_u \quad (1)$$

όπου A_{ul} είναι ο λεγόμενος ρυθμός της μετάπτωσης (radiative transition rate), ή πιθανότητα της μετάπτωσης, ή πιθανότητα αυθόρμητης εκπομπής. Η ακριβής τιμή του A_{ul} για κάθε μετάπτωση μπορεί να υπολογισθεί κβαντομηχανικά.



Σχήμα 3α. Μεταβολή του πληθυσμού N_u της κατάστασης u ως συνάρτηση του χρόνου t .



Σχήμα 3β. Μετάπτωση ηλεκτρονίου από κατάσταση u σε l με εκπομπή ακτινοβολίας με πιθανότητα A_{ul} .

Η λύση της εξίσωσης αυτής είναι η

$$N_u = N_u^0 e^{-A_{ul}t} \quad (2)$$

όπου N_u^0 είναι η πυκνότητα πληθυσμού αρχικά (μόλις τελείωσε η διέγερση). Μπορούμε να ορίσουμε ένα χρόνο τ_u σύμφωνα με τη σχέση

$$N_u = N_u^0 e^{-t/\tau_u} \quad (3)$$

όπου το $\tau_u = 1/A_{ul}$ ονομάζεται "χρόνος ζωής" της κατάστασης u . Για την περίπτωση που το επίπεδο u αποδιεγείρεται σε περισσότερα επίπεδα (i, j, k, \dots) μπορούμε να γενικεύσουμε την (1), οπότε έχουμε την

$$\frac{dN_u}{dt} = -(A_{ui} + A_{uj} + A_{uk} + \dots)N_u = -\left(\sum_i A_{ui}\right)N_u \quad (4)$$

η οποία έχει τη λύση

$$N_u = N_u^0 \exp\left\{-\left(\sum_i A_{ui}\right)t\right\} \quad (5)$$

Συγκρίνοντας τις (3) και (5) προκύπτει ότι

$$\tau_u = \frac{1}{\sum_i A_{ui}} \quad (6)$$

Η (6) δηλώνει ότι ο χρόνος ζωής της κατάστασης u καθορίζεται πλήρως από τους ρυθμούς αποδιέγερσης A_{ui} σε όλα τα κατώτερα επίπεδα.

Το αντίστροφο του χρόνου ζωής ονομάζεται **σταθερά αποδιέγερσης λόγω εκπομπής**, και δίνεται από την

$$\gamma_u^{rad} = \frac{1}{\tau_u} = \sum_i A_{ui} \quad (7)$$

οπότε η (5) γίνεται

$$N_u = N_u^0 e^{-\gamma_u t} \quad (8)$$

Μεταπτώσεις λόγω κρούσεων

Τα παραπάνω ισχύουν για άτομα που μπορούν να θεωρηθούν απομονωμένα. Αυτό όμως σπάνια συμβαίνει στην πράξη και σε πολλές περιπτώσεις τα διεγερμένα άτομα συγκρούονται με άλλα γειτονικά. Το αποτέλεσμα είναι να αποδιεγείρονται χωρίς εκπομπή ακτινοβολίας μεταφέροντας την ενέργεια στο άτομο

με το οποίο ήλθαν σε σύγκρουση. Κατ' αυτό τον τρόπο ελαττώνεται ο πληθυσμός N_u , χωρίς την εκπομπή φωτονίων, δηλ. ελαττώνεται ο χρόνος ζωής της κατάστασης u , ή ισοδύναμα αυξάνεται το γ_u , κατά γ_u^{coll} , που ονομάζεται **σταθερά αποδιέγερσης λόγω κρούσεων**. Άρα, συνολικά η σταθερά αποδιέγερσης γίνεται

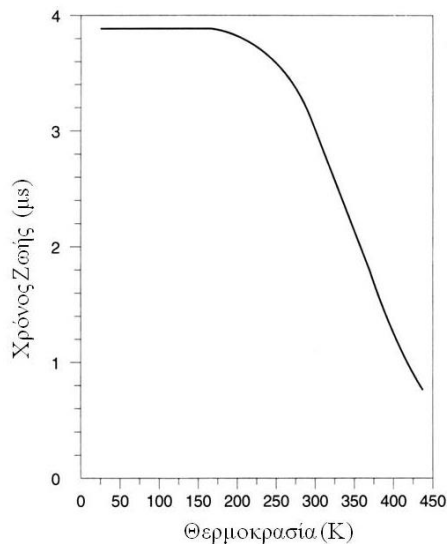
$$\gamma_u = \gamma_u^{\text{rad}} + \gamma_u^{\text{coll}} \quad (9)$$

και ο χρόνος ζωής παίρνει την μορφή

$$\tau_u = \frac{1}{\gamma_u} = \frac{1}{\gamma_u^{\text{rad}} + \gamma_u^{\text{coll}}} \quad (10)$$

Μεταπτώσεις λόγω κρούσεων συμβαίνουν σε όλων των ειδών τα υλικά. Στα αέρια τα άτομα βρίσκονται σε συνεχή κίνηση και συγκρούονται μεταξύ τους, στα υγρά τα διεγερμένα άτομα συγκρούονται με τα άλλα άτομα του περιβάλλοντος και στα στερεά έχουμε κρούσεις με κύματα τα οποία ονομάζονται φωνόνια και τα οποία αναφέρονται σε συντονισμένες μετατοπίσεις του πλέγματος (lattice vibrations).

Προφανώς, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, αυξάνονται και οι συγκρούσεις, άρα περιμένουμε να ελαττώνεται ο χρόνος ζωής μιάς διεγερμένης κατάστασης, όπως φαίνεται στο σχήμα 4. Το σχήμα αυτό δείχνει τη μεταβολή χρόνου ζωής της διεγερμένης κατάστασης για μια μετάπτωση laser σε ένα υλικό που αποτελείται από άτομα τιτανίου τοποθετημένα σε μια κρυσταλλική δομή ζαφειριού (sapphire, Al_2O_3). Όταν αυξηθεί η θερμοκρασία, οι ταλαντώσεις του πλέγματος αυξάνονται και οι κρούσεις με τα αντίστοιχα φωτόνια των διεγερμένων ατόμων του τιτανίου προκαλούν αποδιεγέρσεις χωρίς εκπομπή φωτονίου, ελαττώνοντας το χρόνο ζωής από τα $3.9\mu\text{s}$ που είναι σε χαμηλές θερμοκρασίες στα $3.0\mu\text{s}$ για θερμοκρασία δωματίου.



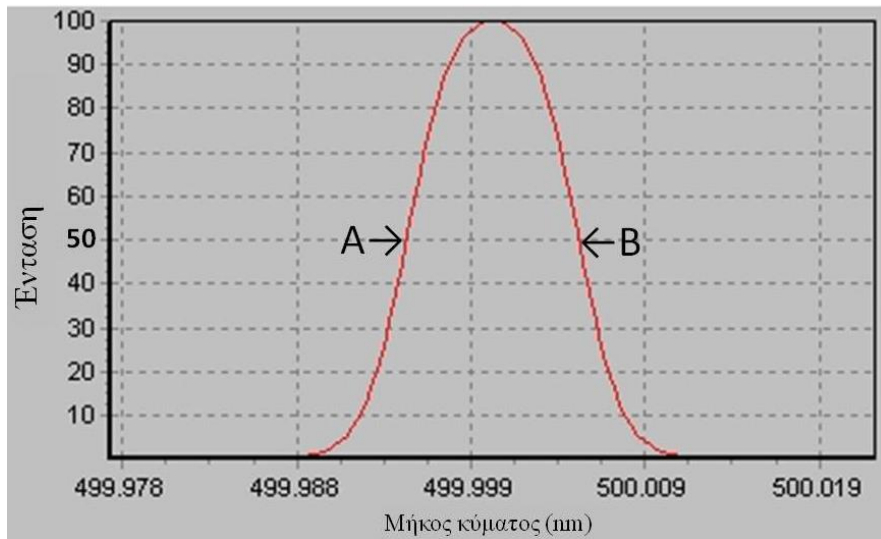
Σχήμα 4. Ο χρόνος ζωής για το άνω επίπεδο της μετάπτωσης στο *laser Ti:Sapphire* ως συνάρτηση της θερμοκρασίας.

2.3 Το εύρος μιας φασματικής γραμμής

Όταν εξετάζουμε μια φασματική γραμμή με ένα φασματογράφο, παρατηρούμε ότι εμφανίζεται ένα πεπερασμένο εύρος, που εξαρτάται από το πλάτος της σχισμής που χρησιμοποιήσαμε (ή από την σταθερά του φράγματος, εαν ο φασματογράφος χρησιμοποιεί φράγμα περίθλασης ως στοιχείο διασποράς). Στο Σχήμα 5 φαίνεται η κατανομή έντασης συναρτήσεως του μήκους κύματος για μία φασματική γραμμή κεντρικού μήκους κύματος 500nm . Το εύρος της γραμμής ορίζεται ως η απόσταση (εδώ σε nm^{11}) μεταξύ δύο σημείων A και B (βλ. σχήμα) των οποίων οι εντάσεις

¹¹ Αλλά μπορεί να είναι σε Hz, ή και σε cm^{-1}

αντιστοιχούν στο μισό της μέγιστης έντασης. Εν γένει το εύρος μιας φασματικής γραμμής είναι ανάλογο του πλάτους της σχισμής του φασματογράφου (ή αντιστρόφως ανάλογο της σταθεράς N του φράγματος περίθλασης, στην περίπτωση που το στοιχείο διασποράς του φασματογράφου είναι φράγμα). Όμως, όσο και αν ελαττώσουμε το πλάτος της σχισμής, και ακόμα και με το τελειότερο οπτικό σύστημα, το εύρος της φασματικής γραμμής δεν ελαττώνεται πέρα από μια ελάχιστη τιμή. Τρεις είναι οι βασικοί παράγοντες που συμβάλλουν στον καθορισμό του ελάχιστου εύρους μιας φασματικής γραμμής: α) η αρχή της απροσδιοριστίας που προσδίδει σε μια γραμμή το «φυσικό πλάτος» της (φυσική διαπλάτυνση), β) το φαινόμενο Doppler, γ) οι κρούσεις μεταξύ ατόμων και δ) η παρουσία διαφόρων ισοτόπων του ίδιου στοιχείου.



Σχήμα 5: Κατανομή έντασης συναρτήσει μήκους κύματος μιας φασματικής γραμμής

(α) Φυσική διαπλάτυνση $\Delta\nu_N$ μιας φασματικής γραμμής

Σύμφωνα με την αρχή της απροσδιοριστίας (ή της αβεβαιότητας), η αβεβαιότητα στη μέτρηση της ενέργειας, ΔE , συνδέεται με την αβεβαιότητα στη μέτρηση του χρόνου, Δt , μέσω της σχέσης

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar = h / 2\pi \quad (11)$$

Θεωρώντας ότι η αβεβαιότητα Δt ισούται με τον χρόνο ζωής της κατάστασης, τ_u , για την κατάσταση u , τότε η ΔE_u έχει μια ελάχιστη τιμή:

$$\Delta E_u = \frac{\hbar}{\tau_u} = \hbar \sum_i A_{ui} \quad (12)$$

Τα ίδια ισχύουν για την κατάσταση l οπότε:

$$\Delta E_l = \frac{\hbar}{\tau_l} = \hbar \sum_j A_{lj} \quad (13)$$

με αποτέλεσμα το ολικό ενεργειακό εύρος των δύο καταστάσεων να είναι

$$\Delta E_T = \Delta E_u + \Delta E_l = \hbar \left(\sum_i A_{ui} + \sum_j A_{lj} \right) \quad (14)$$

Μπορούμε, τώρα, να συνδέσουμε το ΔE_T με το εύρος συχνοτήτων της μετάπτωσης $u \rightarrow l$ (βλέπε Σχήμα 6), $\Delta\nu_{ul}$, ως εξής:

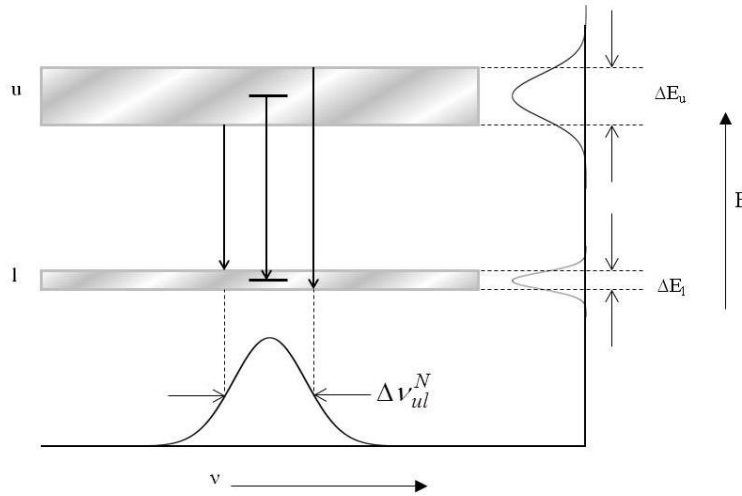
$$\Delta E_T = h\Delta\nu_{ul} \quad (15)$$

Εξισώνοντας τις (10) και (11) προκύπτει η σχέση

$$\hbar \left(\sum_i A_{ui} + \sum_j A_{ij} \right) = h \Delta \nu_{ul} \quad (16)$$

οπότε,

$$\Delta \nu_{ul}^N = \frac{\sum_i A_{ui} + \sum_j A_{ij}}{2\pi} \quad (17)$$



Σχήμα 6: Φυσική διαπλάτωση φασματικής γραμμής που προκύπτει από την μετάπτωση $u \rightarrow l$

(β) Διαπλάτωση λόγω φαινομένου Doppler

Σύμφωνα με το φαινόμενο Doppler, όταν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ της πηγής, που εκπέμπει ένα ημιτονοειδές κύμα συχνότητας ν_0 , και του παρατηρητή, τότε η συχνότητα που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής διαφοροποιείται από την ν_0 . Όταν η πηγή κινείται προς τον παρατηρητή με ταχύτητα ν , τότε ο παρατηρητής αντιλαμβάνεται περισσότερα μέτωπα κύματος ανά μονάδα χρόνου, δηλαδή περισσότερες εναλλαγές του πεδίου, με άλλα λόγια μεγαλύτερη συχνότητα, που δίνεται από τη σχέση (για $\nu/c \ll 1$, όπου c η ταχύτητα του φωτός)

$$\nu = \left(1 + \frac{\nu}{c} \right) \nu_0 \quad (18)$$

ενώ όταν η πηγή απομακρύνεται από τον παρατηρητή,

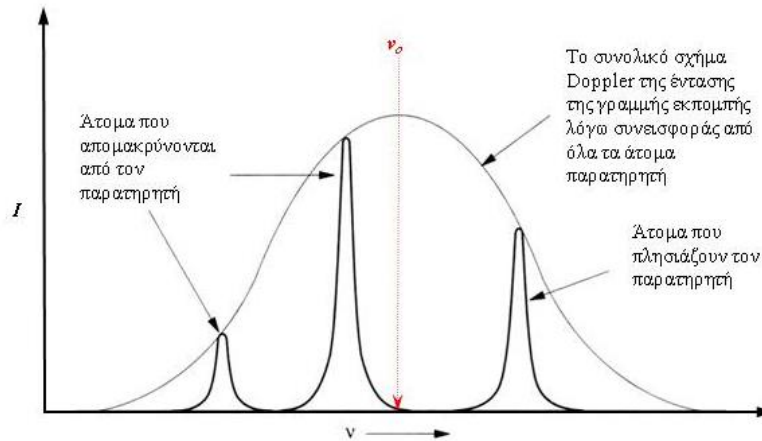
$$\nu = \left(1 - \frac{\nu}{c} \right) \nu_0 \quad (19)$$

Αν όλα τα άτομα ενός δεδομένου αερίου είχαν περίπου την ίδια ταχύτητα λόγω της συνολικής κίνησης του αερίου (όπως π.χ. μπορεί να συμβαίνει στην ατμόσφαιρα ενός άστρου), τότε το εύρος της φασματικής γραμμής δεν θα άλλαζε, αλλά θα μετατοπιζόταν ολόκληρη η γραμμή σε μικρότερη ή μεγαλύτερη συχνότητα, ανάλογα με την κατεύθυνση της κίνησης. Όταν όμως το κέντρο μάζας του συστήματος είναι ακίνητο, τα άτομα, που κινούνται σε τυχαίες κατευθύνσεις (κίνηση Brown) με ταχύτητες που ακολουθούν μια Μαξγουελιανή κατανομή, θα προκαλέσουν διαπλάτωση της φασματικής γραμμής, (χωρίς συνολική μετατόπιση), καθώς αυτή θα αποτελείται από ένα σύνολο συχνοτήτων συμμετρικά μετατοπισμένων ως προς την κεντρική συχνότητα (βλ. σχήμα 7)

Η μέση ταχύτητα για ένα αέριο θερμοκρασίας T , δίνεται από τη σχέση

$$\bar{\nu} = \sqrt{\frac{8kT}{M\pi}} \quad (20)$$

όπου k είναι η σταθερά *Boltzmann* και M η μάζα του ατόμου. Είναι προφανές ότι η διαπλάτυνση είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του αερίου.



Σχήμα 7. Το σχήμα της έντασης I μιας γραμμής εκπομπής που έχει υποστεί διαπλάτυνση Doppler. Φαίνονται, επίσης, οι γραμμές εκπομπής των ατόμων που κινούνται σε διάφορες κατευθύνσεις και έχουν φυσική διαπλάτυνση. Τα άτομα, ανάλογα με τις ταχύτητές τους, φαίνονται να εκπέμπουν σε διάφορες συχνότητες γύρω από τη ν_0 (που είναι η συχνότητα αναφοράς δηλ. για ακίνητη πηγή και ακίνητο παρατηρητή).

Μπορεί να αποδειχθεί ότι το εύρος κατανομής λόγω *Doppler* (*Doppler width*) δίνεται από την σχέση:

$$\Delta \nu^D = 2\nu_0 \sqrt{\frac{2(\ln 2)kT}{Mc^2}} = (7.16 \times 10^{-7}) \nu_0 \sqrt{\frac{T}{M_N}} \quad (21)$$

όπου το T είναι σε βαθμούς *Kelvin*, M_N είναι ο μαζικός αριθμός και ν_0 η συχνότητα σε Hz ($=1/\text{sec}$).

Ακολουθεί ένας πίνακας διαπλάτυσεων, φυσικών και *Doppler*, για μερικές πολύ γνωστές μεταπτώσεις laser.

Πίνακας 1. Διαπλάτυσεις, φυσικές ($\Delta\nu_N$) και *Doppler* ($\Delta\nu_D$), για διάφορα είδη laser

Laser Species	λ (nm)	f	A (s^{-1})	$\Delta\nu_N$ (Hz)	$\Delta\nu_D$ (Hz)
Neon (He-Ne)	632.8	0.012	3.4×10^6	5.4×10^5	1.5×10^9
Argon ion	488.0	0.418	7.8×10^7	1.2×10^7	2.7×10^9
Cadmium (He-Cd)	441.6	0.006	1.4×10^6	2.2×10^5	1.1×10^9
Copper	510.5	0.005	2.0×10^6	2.2×10^7	2.3×10^9

(γ) Διαπλάτυνση που προκαλείται από κρούσεις

Η αλληλεπίδραση των ατόμων (κρούσεις) προκαλεί διαπλάτυνση των φασματικών γραμμών εκπομπής. Η διαπλάτυνση λόγω κρούσεων μπορεί να διαιρεθεί σε δύο κατηγορίες.

Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει κρούσεις που ελαττώνουν το χρόνο ζωής τ_u (εξίσωση 10) και τροποποιούν τις σταθερές αποδιέγερσης, τόσο της u όσο και της l , σύμφωνα με την εξίσωση (9). Συνεπώς, στην φυσική διαπλάτυνση της αντίστοιχης φασματικής γραμμής (εξισώσεις 16, 17) θα προστεθεί ένας όρος που σχετίζεται με την μεταβολή του χρόνου ζωής λόγω κρούσεων. Έτσι, η συνολική διαπλάτυνση θα είναι

$$\Delta \nu_{ul} = \frac{1}{2\pi} \left[\left(\sum_i A_{ui} + \sum_j A_{lj} \right) + \gamma_u^{coll} + \gamma_l^{coll} \right] = \Delta \nu_{ul}^N + \frac{1}{2\pi} \left(\gamma_u^{coll} + \gamma_l^{coll} \right) \quad (22)$$

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει περιπτώσεις (dephasing collisions) που η σύγκρουση μεταξύ ατόμων δεν αποδιεγείρει το άτομο (όπως είδαμε προηγουμένως), αλλά απλώς προκαλεί απότομη αλλαγή της φάσης του κύματος που εκπέμπεται. Αυτό προκαλεί διαπλάτνωση της φασματικής γραμμής εκπομπής. Οι πληθυσμοί N_i και N_j δεν μεταβάλλονται με αυτές τις κρούσεις, οι οποίες συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της ακτινοβολίας (μετάπτωσης). Η μεταβολή της φάσης σε κάθε σύγκρουση θεωρείται ότι γίνεται ακαριαία.

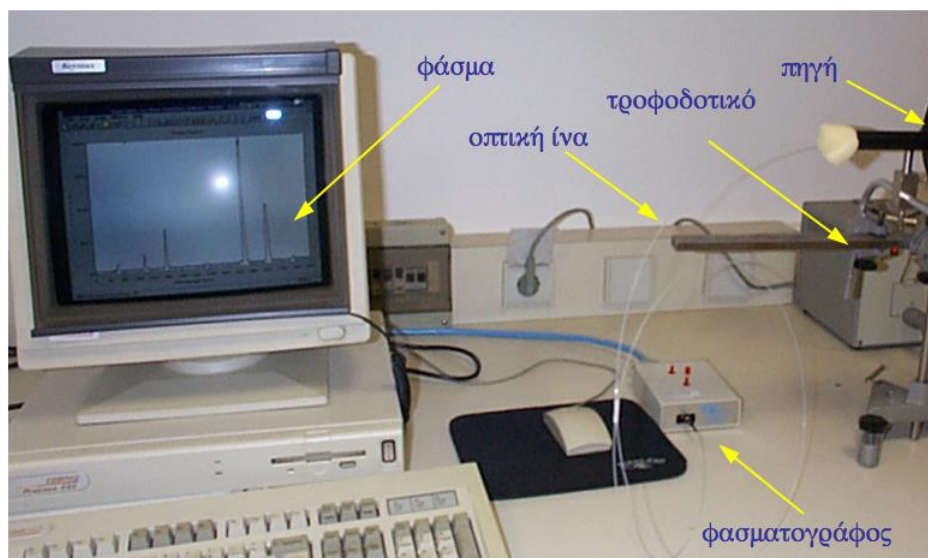
(δ) Διαπλάτνωση λόγω παρουσίας ισοτόπων των στοιχείων

Το ισότοπο ενός ατόμου καθορίζεται από τον αριθμό των νετρονίων του πυρήνα για τον ίδιο αριθμό πρωτονίων. Για παράδειγμα το He απαντάται στη φύση έχει 99.0008% 4He (2 νετρόνια) και 0.00013% 3He (1 νετρόνιο). Το Ne απαντάται ως 90.8% ${}^{20}Ne$ (10 νετρόνια), 0.26% ${}^{21}Ne$ (11 νετρόνια) και 8.9% ${}^{22}Ne$ (12 νετρόνια). Τα ισότοπα έχουν τα ενεργειακά τους επίπεδα μετατοπισμένα, επομένως η εκπεμπόμενη συχνότητα ν_0 θα διαφέρει. Υπάρχουν δύο λόγοι μετατόπισης των ενεργειακών σταθμών. Ο πρώτος έχει να κάνει με τη μεταβολή της μάζας και παρέχει αύξηση της συχνότητας εκπομπής για επιπλέον νετρόνια. Ο δεύτερος έχει να κάνει με τη μεταβολή του όγκου του πυρήνα. Αυτό το φαινόμενο είναι σημαντικό μόνο για βαρείς πυρήνες και εξαρτάται από την ηλεκτρονική κατανομή των στοιχείων (είναι σημαντική μόνο αν οι δύο καταστάσεις της μετάπτωσης έχουν διαφορετικό αριθμό s ηλεκτρονίων).

3. Πειραματική Διάταξη

3.1 Απαιτούμενος εξοπλισμός

- Φασματικές πηγές (λάμπες υδραργύρου (Hg), ιωδιούχου θαλλίου (Tl), νατρίου (Na) με τα κατάλληλα τροφοδοτικά και μία λάμπα πυρακτώσεως.
- Τράπεζα στήριξης φασματικών πηγών και συστήματος οπτικής ίνας.
- Συστήματα στήριξης φασματικών πηγών και οπτικής ίνας.
- Οπτική ίνα για την οδήγηση του φωτός στο φασματοσκόπιο.
- Φασματοσκόπιο οπτικής ίνας της εταιρίας Ocean Optics μοντέλο S2000.
- A/D converter της εταιρίας Ocean Optics μοντέλο ADC-500
- Υπολογιστής PC με Windows.

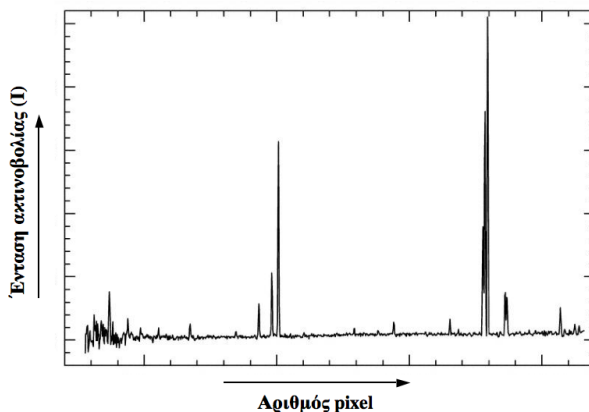


Σχήμα 8: Πειραματική διάταξη

3.2 Περιγραφή των χρησιμοποιούμενων οργάνων

Φασματογράφος οπτικής ίνας

Το φασματοσκόπιο S2000 οπτικής ίνας (Σχήμα 8) της εταιρίας Ocean Optics είναι μια μικρογραφία ενός φασματογράφου τύπου Czerny-Turner. Το φως μεταφέρεται στην είσοδο του φασματογράφου με την βοήθεια κατάλληλης οπτικής ίνας (εξ' ου και το όνομά του). Αποτελείται από μια σχισμή εισόδου με πλάτος 50 μm , ένα φακό που εστιάζει το φως από την σχισμή σε ένα φράγμα περίθλασης 600 γραμμών/mm (με κατάλληλα κάτοπτρα). Η περιθλώμενη ακτινοβολία προσπίπτει σε ένα γραμμικό πλέγμα από φωτοδιόδους τοποθετημένες σε μορφή ολοκληρωμένου κυκλώματος. Στην ουσία ο δέκτης φωτός είναι ένα Linear CCD array με 2048 μικροσκοπικούς δέκτες φωτός, που στη συνέχεια θα τους ονομάζουμε pixels, τοποθετημένους ο ένας δίπλα στον άλλο. Ένα pixel έχει διάσταση 12.5 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$. Όταν ένα φωτόνιο πέσει πάνω στην φωτοευαίσθητη επιφάνεια ενός pixel παράγει ένα ηλεκτρόνιο (μέσω φωτοηλεκτρικού φαινομένου), το οποίο αποθηκεύεται στο pixel, μέχρις ότου να δοθεί η εντολή «ανάγνωσης» της CCD, δηλ. μέτρησης του φορτίου που έχει συγκεντρωθεί σε κάθε pixel. Αυτό επιτυγχάνεται με κατάλληλα ηλεκτρονικά που μετατρέπουν το φορτίο σε ηλεκτρικό ρεύμα αναλογικής μορφής και κατάλληλης εντάσεως. Στη συνέχεια το ρεύμα αυτό οδηγείται στη είσοδο μίας συσκευής που το μετατρέπει σε ψηφιακή μορφή (A/D board). Η συσκευή αυτή είναι κατάλληλη να προσαρμόζεται σε υπολογιστή PC, ο οποίος διαθέτει κατάλληλο λογισμικό (software) που μας απεικονίζει την ένταση του φωτός για κάθε ένα μικροσκοπικό δέκτη (pixel) στην οθόνη του υπολογιστή. Στο Σχήμα 9 φαίνεται ένα παράδειγμα φάσματος όπως εμφανίζεται στην οθόνη του υπολογιστή



Σχήμα 9: Παράδειγμα λαμβανομένου φάσματος

3.3 Πειραματική διαδικασία

ΠΡΟΣΟΧΗ: Μην αγγίζετε τις λάμπες, παρά μόνο στις βάσεις τους, διότι μπορεί να καείτε!

3.3.1 Προκαταρκτικά βήματα

- Ανοίξτε τον υπολογιστή και τρέξτε τα Windows.
- Ενεργοποιήστε το πρόγραμμα για το φασματοσκόπιο με όνομα OOIBase.
- Εξοικειωθείτε με την λειτουργία του.

3.3.2 Βαθμονόμηση συστήματος

Το πρώτο βήμα, όταν χρησιμοποιούμε ένα φασματογράφο για οποιαδήποτε εφαρμογή, είναι να τον «βαθμονομήσουμε», όπως λέγεται, ώστε να γνωρίζουμε ποια μήκη κύματος αντιστοιχούν στα διάφορα pixel του ανιχνευτή μας.

- Τοποθετήστε την λάμπα υδραργύρου στην οπτική τράπεζα και τροφοδοτήστε την.
- Παρατηρήστε το συνολικό φάσμα της στον υπολογιστή και κάνετε ρυθμίσεις, έτσι ώστε να επιτύχετε μέγιστη ακτινοβολία για την υψηλότερης έντασης φασματική γραμμή. Προσέξτε η γραμμή να μην είναι κορεσμένη.
- Τοποθετήστε τον δρομέα στο μέγιστο κάθε φασματικής γραμμής και σημειώστε τον αντίστοιχο αριθμό pixel.

- Συμπληρώστε τον ακόλουθο πίνακα με τις μετρήσεις σας.
- Εκτιμήστε το σφάλμα που κάνετε στον καθορισμό του κεντρικού pixel
- Με τα πειραματικά δεδομένα για την λάμπα υδραργύρου φτιάξτε τον παρακάτω πίνακα:

$\lambda_{\text{θεωρ}} \text{ (nm)}$	365.02	404.66	435.84	546.08	579.07
Θέση pixel (p)					
Σφάλμα (Δp)					

- Κάντε την γραφική παράσταση του μήκους κύματος λ συναρτήσει της θέσης p
- Προσομοιώστε τα αποτελέσματά σας με εξίσωση πρώτου βαθμού της μορφής $\lambda = a + bp$ όπου λ το μήκος κύματος σε nm και p τα pixel και προσδιορίστε τους συντελεστές a , b και τα αντίστοιχα σφάλματα σ_a και σ_b χρησιμοποιώντας την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (από Εργ. Φυσ. Ι και ΙΙ) Αυτή είναι η καμπύλη βαθμονόμησης του φασματογράφου.
- Αν χρειαστεί μπορείτε να χρησιμοποιήσετε καμπύλη 2^{ου} βαθμού. Επίσης, μπορείτε να συμπεριλάβετε στην βαθμονόμησή σας και αμυδρότερες γραμμές, των οποίων τα μήκη κύματος θα βρείτε στην άσκηση του «Οπτικού Φράγματος»).

3.3.3 Προσδιορισμός μήκους κύματος φασματικής γραμμής

- Στη συνέχεια τοποθετήστε τις λάμπες θαλλίου και νατρίου διαδοχικά και επαναλάβετε την ίδια διαδικασία για τις δύο πιο έντονες φασματικές γραμμές εκπομπής τους.
- Με τα στοιχεία αυτά, προσδιορίστε το μήκος κύματος για τις φασματικές γραμμές του θαλλίου και του νατρίου, χρησιμοποιώντας την καμπύλη βαθμονόμησης που προσδιορίσατε στο προηγούμενο μέρος του πειράματος. Να προσδιορίσετε το πειραματικό σφάλμα του αποτελέσματός σας.

3.3.4 Προσδιορισμός διακριτικής ικανότητας του φασματογράφου

- Τοποθετήστε πάλι την λάμπα υδραργύρου και διαλέξτε μια από τις φασματικές γραμμές.
- Με την βοήθεια του προγράμματος διαλέξτε μία περιοχή pixels έτσι ώστε να βλέπετε στην οθόνη σας μόνο την φασματική γραμμή που διαλέξατε (όπως φαίνεται στο σχήμα 5)
- Μετρήστε τον αριθμό των pixels, $p_{\text{τελικό}} - p_{\text{αρχικό}}$, που αντιστοιχούν στο πλάτος της γραμμής, στο μισό της μέγιστης έντασης (full width at half maximum). Υπολογίστε τα αντίστοιχα μήκη κύματος (με την βοήθεια της καμπύλης βαθμονόμησης), και το αντίστοιχο $\Delta\lambda$, για το πλάτος της συγκεκριμένης φασματικής γραμμής.
- Υπολογίστε την διακριτική ικανότητα του φασματοσκοπίου από την εξίσωση $R = \lambda / \Delta\lambda$. Εξηγήστε γιατί ο λόγος R που υπολογίσατε όντως ταυτίζεται με την διακριτική ικανότητα φασματοσκοπίου (όπου το $\Delta\lambda$ είναι η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών φασματικών γραμμών που μόλις ξεχωρίζουν μεταξύ τους, σύμφωνα με το κριτήριο Rayleigh).
- Επαναλάβετε την διαδικασία προσδιορισμού του R και για τις υπόλοιπες γραμμές του φάσματος του Hg. Παρατηρήστε ότι μία από τις γραμμές έχει πολύ μεγαλύτερο πλάτος από τις άλλες. Πού οφείλεται αυτό;
- Βρείτε την μέση τιμή των μετρήσεων σας για το R , και το αντίστοιχο σφάλμα (χωρίς να συμπεριλάβετε την προαναφερθείσα γραμμή). Ποιό είναι το αντίστοιχο φασματικό εύρος, $\Delta\nu = \frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda$ (σε GHz).
- Συγκρίνατε την τάξη μεγέθους των $\Delta\nu$ λόγω φυσικής διαπλάτνωσης και λόγω διαπλάτνωσης Doppler που αναφέρονται στην θεωρία, με το $\Delta\nu$ του φασματογράφου σας. Σχολιάστε.

3.3.5 Μελέτη συνεχούς φάσματος λάμπας πυρακτώσεως

- Τοποθετήστε την λάμπα πυρακτώσεως μπροστά από την είσοδο της οπτικής ίνας.

- Παρατηρήστε το φάσμα που λαμβάνετε στην οθόνη σας. Συγκρίνετέ το με τα φάσματα των άλλων πηγών που χρησιμοποιήσατε. Σχολιάστε.
- Βρείτε το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στο μέγιστο της κατανομής.
- Από τον νόμο μετατόπισης του Wien υπολογίστε την θερμοκρασία του εκπέμποντος σώματος. Υπολογίστε το πειραματικό σφάλμα της μέτρησής σας.
- Σχολιάστε ποιος παράγοντας θα μπορούσε να επηρεάσει σημαντικά την εκτίμησή σας για την θερμοκρασία, και με ποιόν τρόπο θα μπορούσατε να ελαχιστοποιήσετε το σφάλμα αυτό.

Βιβλιογραφία

- H.E. White, Introduction to Atomic Spectra, McGraw-Hill Co.
- S. Walker and H. Straw, Spectroscopy, Vol.1, Chapman, & Hall Ltd and Science paperbacks
- <http://www.nist.gov/pml/data/asd.cfm>

Σημειώματα

Σημείωμα αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Κρήτης, Π. Ρακιτζής, 2014. «Εργαστήριο Φυσικής III - Οπτική». Έκδοση: 1.0. Ηράκλειο 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <https://opencourses.uoc.gr>.

Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση, Όχι Παράγωγο Έργο 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Κρήτης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

