

ΑΣΚΗΣΗ 8

ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΚΒΑΝΤΙΚΩΝ ΜΕΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΟ ΑΤΟΜΟ ΤΟΥ Na

Σκοπός της άσκησης είναι η μελέτη των διεγερμένων ενεργειακών σταθμών του ατόμου του νατρίου και πιο συγκεκριμένα, η εύρεση της ενέργειας των σημαντικότερων κβαντικών μεταπτώσεων μεταξύ των διεγερμένων σταθμών του ατόμου του νατρίου και η μελέτη της λεπτής υφής τους.

1. ΘΕΩΡΙΑ

Ο πιο άμεσος τρόπος μελέτης των διεγερμένων ενεργειακών σταθμών ενός ατόμου είναι μέσω της παρατήρησης του χαρακτηριστικού γραμμικού φάσματος του φωτός που εκπέμπεται κατά την αποδιέγερσή του. Το φως αυτό το παίρνουμε συνήθως με ηλεκτρική εκκένωση σε μία λυχνία που περιέχει το στοιχείο είτε σαν μονοατομικό αέριο ή σαν ατμούς του στοιχείου. Λαμβάνοντας το φάσμα του φωτός με ένα φασματόμετρο, μπορούμε να προσδιορίσουμε τις ενέργειες, τις συχνότητες και τα μήκη κύματος των διαφόρων γραμμών του. Το φάσμα κάθε στοιχείου είναι μοναδικό και αποτελεί το 'δακτυλικό αποτύπωμά' του. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δυνατότητα ανίχνευσης του στοιχείου από την ακτινοβολία του, ακόμη και σε ελάχιστες ποσότητες ή σε μεγάλες αποστάσεις, όπως για παράδειγμα στις επιφάνειες των αστέρων και τον μεσοαστρικό χώρο.

A. Ενεργειακές στάθμες του ατόμου του υδρογόνου

Σύμφωνα με το ατομικό πρότυπο του Rutherford, ένα άτομο αποτελείται από τον πυρήνα και τα περιφερειακά ηλεκτρόνια. Το απλούστερο άτομο είναι το άτομο του υδρογόνου. Αποτελείται από ένα πρωτόνιο γύρω από το οποίο περιστρέφεται ένα ηλεκτρόνιο. Για το άτομο του υδρογόνου, σύμφωνα με το πρότυπο του Bohr, οι ενέργειες όλων των δυνατών καταστάσεων στις οποίες μπορεί να βρεθεί το μοναδικό ηλεκτρόνιο του είναι:

$$E_n = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{m_0 e^4}{2\hbar} \frac{1}{n^2} = -13,6 \text{ eV} \frac{1}{n^2} \quad (8.1)$$

όπου m_0 και e είναι η μάζα ηρεμίας και το φορτίο του ηλεκτρονίου αντίστοιχα και n ένας ακέραιος αριθμός, γνωστός σαν ο *κύριος κβαντικός αριθμός*, που παίρνει τιμές $n = 1, 2, 3, \dots$.

Κατά την αποδιέγερση ενός διεγερμένου ατόμου υδρογόνου, το ηλεκτρόνιο που βρίσκεται σε κάποια ενεργειακή κατάσταση με κύριο κβαντικό αριθμό n μεταπίπτει σε μία άλλη ενεργειακή κατάσταση με κύριο κβαντικό αριθμό m . Η διαφορά της ενέργειας ανάμεσα σ' αυτές τις δύο καταστάσεις αποδίδεται κυρίως με την εκπομπή ενός φωτονίου. Η ενέργεια του εκπεμπόμενου φωτονίου είναι:

$$h\nu = 13,6 \text{ eV} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (8.2)$$

Οι πέντε πρώτες φασματικές σειρές του ατόμου του υδρογόνου είναι γνωστές με τα ονόματα αυτών που τις ανακάλυψαν και είναι οι σειρές Lyman, Balmer, Paschen, Brackett και Pfund. Οι σειρές αυτές προκύπτουν από την σχέση (8.2) για $m = 1, 2, 3, 4$ και 5 αντίστοιχα. Στην ορατή περιοχή του φάσματος βρίσκονται μόνον οι τέσσερις πρώτες γραμμές της σειράς Balmer. Οι υπόλοιπες γραμμές της σειράς Balmer και η σειρά Lyman βρίσκονται στην περιοχή του υπεριώδους, ενώ οι υπόλοιπες σειρές στην περιοχή του υπέρυθρου.

Όπως είναι γνωστό από την Ατομική Φυσική, το πρότυπο του Bohr δεν μπορεί να περιγράψει το παρατηρούμενο φάσμα των ατόμων εκτός ίσως από του υδρογόνου. Επιλύοντας την εξίσωση Schrödinger στο πρότυπο του ατόμου εισάγεται ο *δευτερεύων κβαντικός αριθμός* l , $l = 0, 1, 2, \dots, n - 1$. Στο νέο πρότυπο του ατόμου, οι ενεργειακές καταστάσεις περιγράφονται πλέον με την βοήθεια δύο κβαντικών αριθμών, του κύριου και του δευτερεύοντα κβαντικού αριθμού.

B. Διαχωρισμός των ενεργειακών σταθμών λόγω του spin των ηλεκτρονίων

Οι ενεργειακές στάθμες E_n στην πραγματικότητα δεν είναι απλές, όπως προβλέπονται από την σχέση (8.1), αλλά διαχωρίζονται σε ένα σύνολο πύο κοντινών υποσταθμών. Αυτό μπορεί να γίνει φανερό με την λεπτομερή παρατήρηση των φασματικών γραμμών με φασματόμετρα υψηλής διακριτικής ικανότητας. Η παρατήρηση δείχνει ότι οι φασματικές γραμμές δεν είναι απλές, αλλά αποτελούνται από ένα σύνολο γραμμών με παραπλήσια μήκη κύματος. Αυτό ονομάζεται *λεπτή υφή* των φασματικών γραμμών. Ο διαχωρισμός των γραμμών λόγω της λεπτής υφής στο φάσμα του υδρογόνου είναι πολύ μικρός, της τάξης του 10^{-2} nm. Για την παρατήρησή της απαιτούνται φασματόμετρα με διακριτική ικανότητα καλύτερη από 10^4 . Όμως, για τα άτομα με πολλά ηλεκτρόνια η λεπτή υφή μπορεί να παρατηρηθεί πύο εύκολα λόγω του μη κεντρικού δυναμικού τους, όπως θα εξηγηθεί παρακάτω.

Η επιτυχία της σχέσης (8.1) περιορίζεται μόνο στην ερμηνεία των φασμάτων του υδρογόνου και των υδρογονοειδών ατόμων¹, χωρίς να μπορεί να αιτιολογήσει την

¹ Υδρογονοειδή είναι τα άτομα που έχουν χάσει όλα τους τα ηλεκτρόνια εκτός από ένα.

παρατηρούμενη λεπτή υφή των φασματικών γραμμών. Η λεπτή υφή αιτιολογήθηκε με την εισαγωγή της σχετικιστικής κυματικής εξίσωσης του Dirac, η οποία εισάγει, εκτός από την τροχιακή στροφορμή του ηλεκτρονίου L που χαρακτηρίζεται από τον δευτερεύοντα κβαντικό αριθμό l , και την στροφορμή S λόγω του spin του ηλεκτρονίου που χαρακτηρίζεται από τον κβαντικό αριθμό του spin $s = 1/2$. Η ολική στροφορμή του ηλεκτρονίου είναι:

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$$

που χαρακτηρίζεται από τον κβαντικό αριθμό j . Οι τιμές του j είναι:

$$j = l \pm s$$

Οι ακριβείς τιμές του μέτρου των διανυσμάτων των στροφορμών είναι:

$$\begin{aligned} |L| &= \sqrt{l(l+1)} & l &= 0, 1, 2, \dots \\ |S| &= \sqrt{s(s+1)} & s &= 1/2 \\ |J| &= \sqrt{j(j+1)} & j &= l \pm s \end{aligned} \quad (8.3)$$

Οι δύο διαφορετικές τιμές του j [σχέση (8.3)] αντιστοιχούν στους δύο διαφορετικούς προσανατολισμούς του spin και της τροχιακής στροφορμής του ηλεκτρονίου. Η σύζευξη των L και S εισάγει κάποια επιπρόσθετη δυναμική ενέργεια E_j , μικρή σε σχέση με την E_n , που μπορεί να είναι θετική ή αρνητική. Επειδή η ενέργεια αυτή εξαρτάται από τον τρόπο σύζευξης, οι δύο τιμές του j προφανώς οδηγούν σε δύο διαφορετικές τιμές ενέργειας για κάθε κατάσταση με δεδομένα n και l . Έτσι, καταλήγουμε στον διπλασιασμό των ενεργειακών σταθμών και στην ύπαρξη της λεπτής υφής. Άρα, σύμφωνα με τον Dirac:

$$E_{n,l} = E_{n,j} + E_j$$

Γ. Μεταπτώσεις μεταξύ ενεργειακών σταθμών ενός ατόμου

Όταν ένα άτομο βρίσκεται σε διεγερμένη κατάσταση, μπορεί να μεταπέσει στην βασική κατάσταση είτε απ' ευθείας με μιά μετάπτωση, είτε με διαδοχικές μεταπτώσεις σε ενδιάμεσες στάθμες. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων οι μεταπτώσεις είναι ακτινοβολούσες, δηλαδή συνοδεύονται από την εκπομπή ενός φωτονίου, η ενέργεια του οποίου ισούται με την ενεργειακή διαφορά των δύο σταθμών:

$$h\nu = E_f - E_i$$

όπου E_f και E_i είναι οι ενέργειες της τελικής και της αρχικής κατάστασης της μετάπτωσης αντίστοιχα.

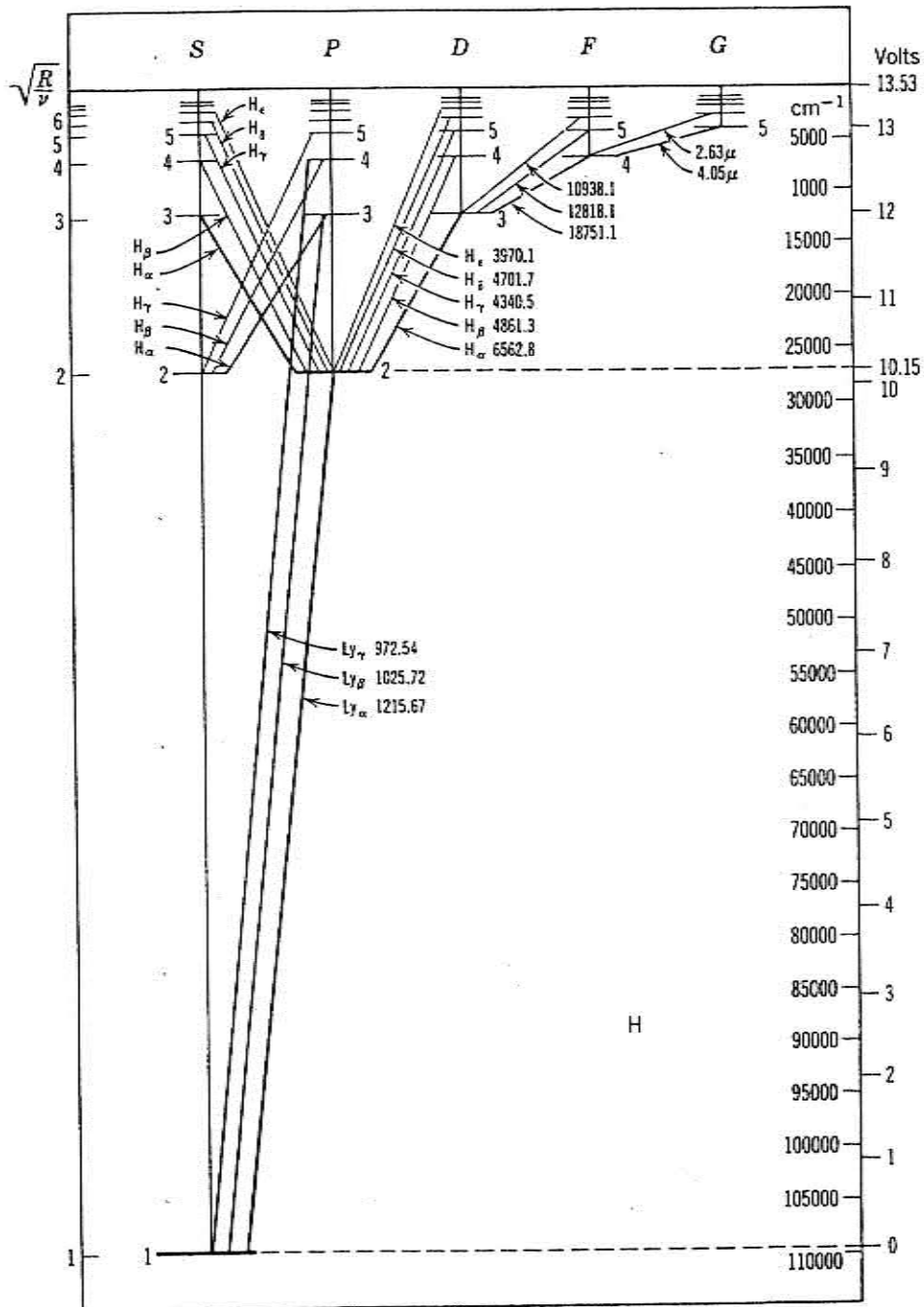
Ο νόμος της διατήρησης της στροφορμής και το γεγονός ότι ένα φωτόνιο έχει στροφορμή ίση με \hbar , επιβάλλουν κάποιους περιορισμούς στις μεταβολές των κβαντικών αριθμών κατά την μετάπτωση (κανόνες επιλογής).

Για τον κύριο κβαντικό αριθμό δεν υφίσταται κανένας περιορισμός, δηλαδή:

$$\Delta n = 0, 1, 2, \dots$$

Για τον δευτερεύοντα κβαντικό αριθμό ισχύει ο κανόνας επιλογής :

$$\Delta l = \pm 1$$



Σχήμα 8.1 Οι ενεργειακές στάθμες του ατόμου του υδρογόνου και οι επιτρεπτές μεταπτώσεις. Τα μήκη κύματος είναι σε Å.

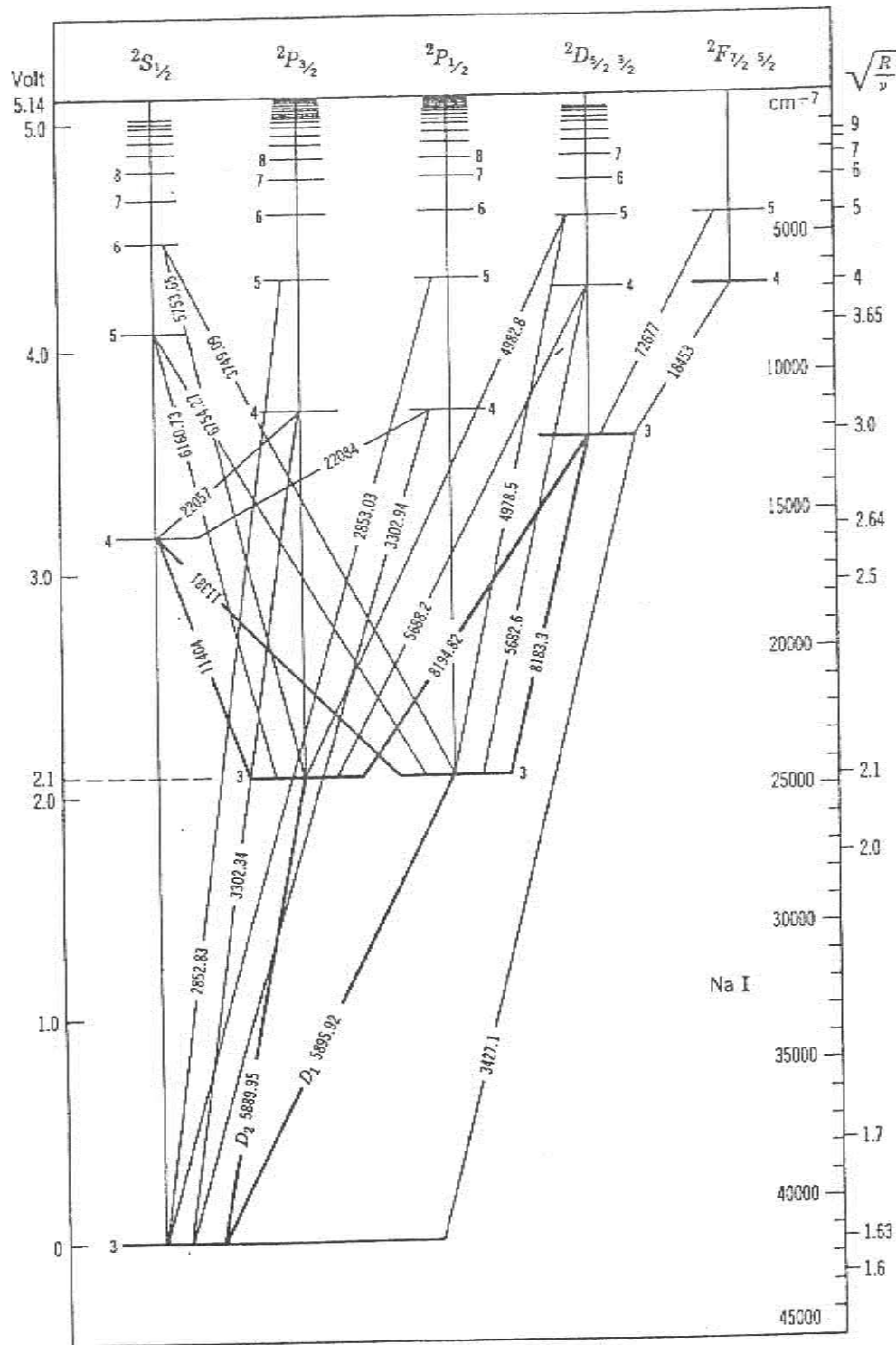
Για τον κβαντικό αριθμό της ολικής στροφορμής j ισχύει ο κανόνας επιλογής:

$$\Delta j = \pm 1 \text{ ή } 0$$

Οι παραπάνω κανόνες επιλογής καθορίζουν και το σύνολο των εκπεμπόμενων φασματικών γραμμών.

Δ. Τα φάσματα των αλκαλίων

Τα φάσματα των αλκαλίων έχουν πολλές ομοιότητες με τα φάσματα του υδρογόνου και των υδρογονοειδών ατόμων, επειδή τα ηλεκτρόνιά τους διατάσσονται σε



Σχήμα 8.2 Οι ενεργειακές στάθμες του οπτικά ενεργού ηλεκτρονίου του ουδέτερου ατόμου του νατρίου και οι επιτρεπτές μεταπτώσεις του. Η βασική ενεργειακή κατάσταση είναι η $3s$ με ενέργεια $5,14 \text{ eV}$. Τα μήκη κύματος είναι σε \AA .

πλήρεις ηλεκτρονικούς φλοιούς, εκτός από ένα ηλεκτρόνιο που βρίσκεται μόνο του στον εξωτερικό φλοιό του ατόμου. Μπορούμε να θεωρήσουμε, σε πρώτη προσέγγιση, ότι αυτό το ηλεκτρόνιο κινείται σε ένα σφαιρικά συμμετρικό δυναμικό, όπως στο άτομο του υδρογόνου, όπου το καθαρό θετικό φορτίο ισούται με το δραστικό φορτίο

Z_{eff} , όπως θα δούμε παρακάτω. Το ηλεκτρόνιο αυτό χαρακτηρίζεται και σαν *οπτικά ενεργό ηλεκτρόνιο*, επειδή το οπτικό φάσμα των αλκαλίων οφείλεται στις μεταπτώσεις αυτού του ηλεκτρονίου.

Οι γραμμές που παρατηρούνται στα φάσματα των αλκαλίων μπορούν γενικά να ταξινομηθούν σε τρεις κύριες σειρές. Η πρώτη περιλαμβάνει τις πιο φωτεινές γραμμές και ονομάζεται *κύρια σειρά*. Οι γραμμές αυτές είναι υπεύθυνες για το χρώμα που παρουσιάζουν οι ατμοί των αλκαλίων όταν φωτοβολούν. Η δεύτερη σειρά περιλαμβάνει τις γραμμές που είναι λιγότερο έντονες από τις γραμμές της κύριας σειράς αλλά έχουν σαφή όρια περάτωσης. Η σειρά αυτή λέγεται *σαφής*. Η τρίτη σειρά περιλαμβάνει γραμμές που δεν είναι έντονες και δεν έχουν σαφή όρια περάτωσης.

Επειδή στην άσκηση αυτή θα μελετηθεί το φάσμα του νατρίου, ας δούμε αναλυτικά την δομή του. Το νάτριο έχει συνολικά 11 ηλεκτρόνια τα οποία κατανομούνται όπως φαίνεται στον πίνακα 8.1.

Πίνακας 8.1
Κατανομή των ηλεκτρονίων του νατρίου.

n	l	Αριθμός ηλεκτρονίων
1 (K)	0 (S)	2
2 (L)	0 (S)	2
	1 (P)	6
3 (M)	0 (S)	1

Οι φασματικές γραμμές του νατρίου οφείλονται στο ηλεκτρόνιο της εξώτατης στοιβάδας, οπτικά ενεργό ηλεκτρόνιο, που στην βασική κατάσταση έχει κύριο κβαντικό αριθμό $n = 3$ και δευτερεύοντα κβαντικό αριθμό $l = 0$, σχήμα 8.2. Ο συμβολισμός της κατάστασης αυτής είναι $3^2 S_{1/2}$. Ο πρώτος αριθμός (3) δείχνει τον κύριο κβαντικό αριθμό. Το κεφαλαίο γράμμα S δείχνει την υποστοιβάδα $l = 0$ (δευτερεύων κβαντικός αριθμός). Στα άτομα με πολλά ηλεκτρόνια οι υποστοιβάδες συμβολίζονται με κεφαλαία γράμματα, π.χ. S, P, D, F, ... για $l = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$ αντίστοιχα. Ο εκθέτης μπροστά από το σύμβολο της υποστοιβάδας δείχνει την πολλαπλότητα της κατάστασης, ενώ ο δείκτης μετά το σύμβολο της υποστοιβάδας δείχνει τον κβαντικό αριθμό της ολικής στροφορμής του ηλεκτρονίου.

Ε. Το δραστικό φορτίο

Γνωρίζουμε ότι, όσο μεγαλύτερο είναι το l τόσο η τροχιά του ηλεκτρονίου πλησιάζει την κυκλική. Άρα, στην περίπτωση των μεγάλων τιμών του l , το ηλεκτρόνιο του νατρίου 'βλέπει' τον πυρήνα 'από μεγάλη' απόσταση. Στην περίπτωση αυτή, το φορτίο του πυρήνα προασπίζεται από τα 10 πιο εσωτερικά ηλεκτρόνια και το εξωτερικό ηλεκτρόνιο κινείται σε ένα δυναμικό που προέρχεται από ένα φορτίο $Z = 1$. Οι ενεργειακές καταστάσεις αυτού του ηλεκτρονίου είναι παρόμοιες με τις αντίστοιχες του ατόμου του υδρογόνου.

Στην βασική κατάσταση του νατρίου, το εξωτερικό ηλεκτρόνιο έχει στροφορμή ίση με μηδέν, $l = 0$. Έτσι, ένα μεγάλο μέρος του χρόνου του τον δαπανά πιο κοντά

στον πυρήνα, μέσα στο νέφος που σχηματίζουν τα υπόλοιπα ηλεκτρόνια. Στην περίπτωση αυτή το ηλεκτρόνιο αισθάνεται την επίδραση ενός φορτίου που μπορεί να κυμαίνεται από $Z = 11$ ως $Z = 1$. Η μέση τιμή του φορτίου που αισθάνεται το ηλεκτρόνιο αυτό λέγεται δραστικό φορτίο, Z_{eff} . Το δραστικό φορτίο μας επιτρέπει να απλουστεύσουμε τις σχέσεις που περιγράφουν τις ενεργειακές καταστάσεις αυτού του ηλεκτρονίου:

$$E_n = -13.6Z_{eff}^2 \frac{1}{n^2}$$

Το δραστικό φορτίο, επειδή είναι συνάρτηση των n και l είναι διαφορετικό για κάθε διαφορετικό συνδυασμό των n και l .

ΣΤ. Λεπτή υφή των αλκαλίων

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ενέργεια του οπτικά ενεργού ηλεκτρονίου του νατρίου εξαρτάται μόνον από τον κύριο κβαντικό αριθμό n . Αυτό όμως, όπως προβλέπει η κβαντομηχανική και αποδεικνύουν τα πειραματικά δεδομένα, δεν είναι αληθές. Στην πράξη, ηλεκτρόνια με τον ίδιο κύριο κβαντικό αριθμό n και διαφορετικό δευτερεύοντα κβαντικό αριθμό l έχουν διαφορετικές ενέργειες. Οι διαφορές γίνονται μεγαλύτερες στα μεγάλα n και σε άτομα με πολλά ηλεκτρόνια και, όπως είδαμε, οφείλονται στο ότι το δραστικό φορτίο Z_{eff} δεν είναι ένα σημειακό φορτίο περιορισμένο στον πυρήνα, όπως στο υδρογόνο και στα υδρογονοειδή άτομα. Με ένα τέτοιο δυναμικό, οι αλληλεπιδράσεις του spin του ηλεκτρονίου με τα μαγνητικά πεδία που προέρχονται από την κίνηση των φορτίων των υπόλοιπων ηλεκτρονίων και του πυρήνα, διαφοροποιούνται για διαφορετικά l , ακόμη και αν το j είναι το ίδιο.

Η διαφορά αυτή είναι χαρακτηριστική στην περίπτωση της κίτρινης γραμμής του νατρίου, γραμμή D σχήμα 8.2. Αν αναλύσουμε την κίτρινη γραμμή του νατρίου, παρατηρούμε ότι αυτή είναι διπλή και αποτελείται από τις γραμμές D_1 και D_2 , λεπτή υφή του φάσματος. Όπως είδαμε σε προηγούμενη παράγραφο, η λεπτή υφή του υδρογόνου και των υδρογονοειδών ατόμων ανιχνεύεται μόνον με φασματομέτρα πολύ υψηλής διακριτικής ικανότητας. Η λεπτή υφή στο άτομο του νατρίου και γενικότερα στα άτομα των αλκαλίων είναι εύκολα παρατηρήσιμη ακόμη και με σχετικά απλά φασματομέτρα.

Η γραμμή D_1 με $\lambda = 589,6$ nm οφείλεται στην μετάπτωση $3P_{1/2} \rightarrow 3S_{1/2}$, δηλαδή από την κατάσταση $n = 3, l = 1, j = 1/2$ στην κατάσταση $n = 3, l = 0, j = 1/2$.

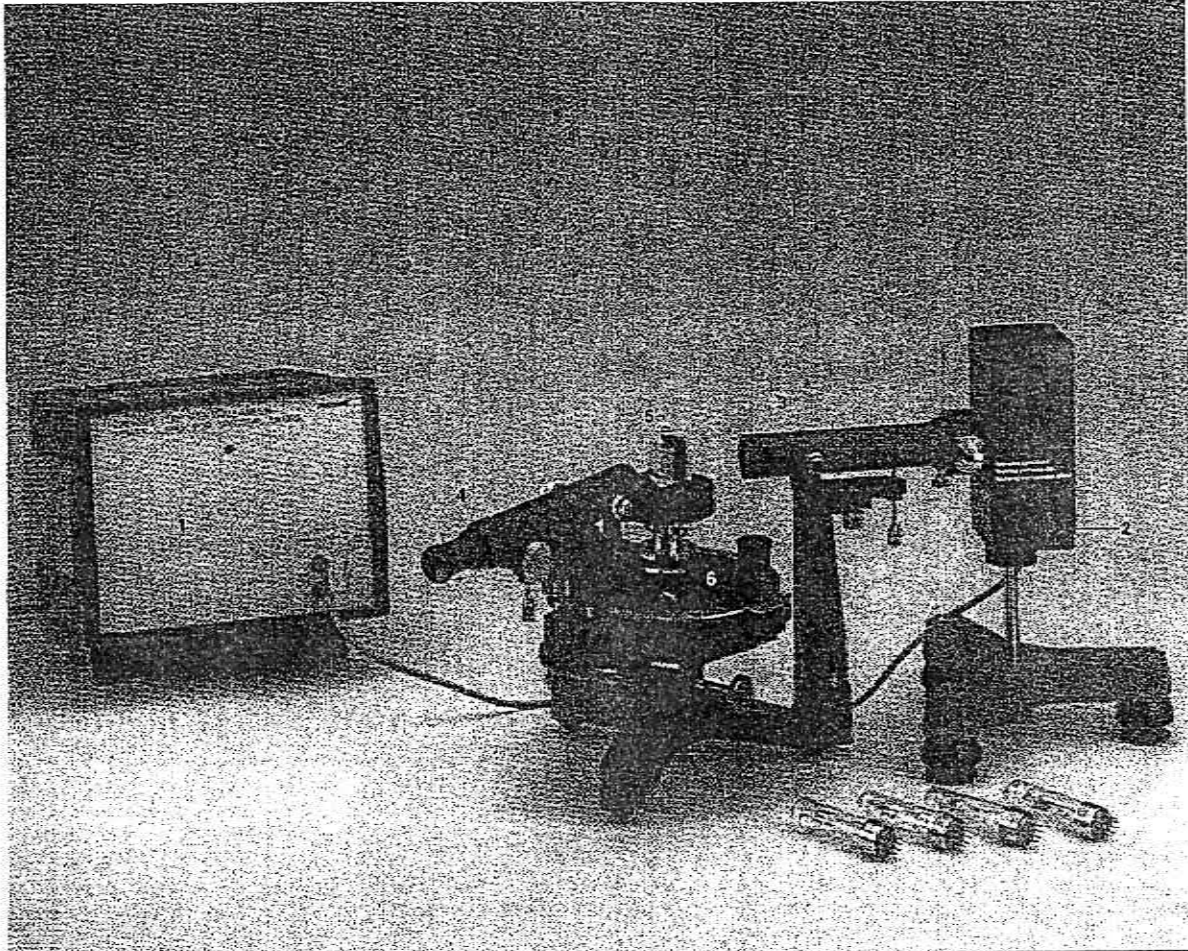
Η γραμμή D_2 με $\lambda = 589,0$ nm οφείλεται στην μετάπτωση $3P_{3/2} \rightarrow 3S_{1/2}$, δηλαδή από την κατάσταση $n = 3, l = 1, j = 3/2$ στην κατάσταση $n = 3, l = 0, j = 1/2$.

Και στις δύο περιπτώσεις ισχύουν οι κανόνες επιλογής $\Delta l = \pm 1$ και $\Delta j = \pm 1, 0$.

II. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από φασματικές λυχνίες με τα τροφοδοτικά τους, μιά γωνιομετρική τράπεζα και ένα σύστημα ανάλυσης οπτικών φασμάτων, σχήμα 8.3.

Η γωνιομετρική τράπεζα αποτελείται από δυο διόπτρες και από έναν δακτύλιο που είναι βαθμολογημένος σε μοίρες για την μέτρηση των γωνιών.



Σχήμα 8.3 Τα κύρια μέρη της πειραματικής διάταξης της άσκησης. 1) Τροφοδοτικό της λυχνίας, 2) Υποδοχέας – βάση της λυχνίας, 3) Διόπτρα φωτισμού, 4) Διόπτρα παρατήρησης, 5) Πρίσμα ή φράγμα περίθλασης, 6) Βαθμολογημένος γωνιομετρικός δακτύλιος με βερνιέρο.

Η μιά διόπτρα, διόπτρα φωτισμού, περιλαμβάνει συστήματα για την ρύθμιση σε ύψος και πάχος της δέσμης του φωτός καθώς και φακούς για την εστίαση της φωτεινής δέσμης. Η δεύτερη διόπτρα, διόπτρα παρατήρησης, περιλαμβάνει ένα προσοφθάλμιο σύστημα φακών με μικρομετρική κλίμακα στο εσωτερικό του. Οι δύο βραχίονες περιστρέφονται γύρω από έναν κοινό άξονα περιστροφής όπου τοποθετείται το σύστημα ανάλυσης των οπτικών φασμάτων. Μαζί με τον δεύτερο βραχίονα κινείται και ένας βερνιέρος για την ακριβή μέτρηση των γωνιών. Η κλίμακα του βερνιέρου αντιστοιχεί σε μισή μοίρα και φέρει 30 υποδιαιρέσεις. Έτσι, η ακρίβεια της ανάγνωσης της γωνίας είναι ίση με $\pm 1'$.

Το σύστημα ανάλυσης των οπτικών φασμάτων μπορεί να είναι ένα πρίσμα ή ένα φράγμα περίθλασης.

Η λειτουργία του πρίσματος βασίζεται στο γεγονός ότι ο δείκτης διάθλασης του υλικού του πρίσματος εξαρτάται από την μήκος κύματος της ακτινοβολίας (αυξάνεται με την αύξηση του μήκους κύματος). Όταν στο πρίσμα προσπέσει φωτεινή ακτινοβολία μεικτού φάσματος, η γωνία εξόδου των διαφόρων συνιστωσών του φάσματος είναι διαφορετική. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το φάσμα να αναλύεται στις συνιστώσες του.

Το φράγμα περίθλασης αποτελείται από σκοτεινές (μη διαπερατές από το φως) και από φωτεινές (διαπερατές από το φως) περιοχές. Η απόσταση μεταξύ δύο φωτει-

νών ή δύο σκοτεινών περιοχών είναι σταθερή και ονομάζεται σταθερά του φράγματος d . Η τιμή της σταθεράς του φράγματος είναι της τάξης μεγέθους του μήκους κύματος της ακτινοβολίας που πρόκειται να αναλυθεί. (Στα φράγματα περίθλασης που κυκλοφορούν στο εμπόριο σαν σταθερά του φράγματος δεν δίνεται η d αλλά το αντίστροφό της που εκφράζεται σε αριθμό γραμμών, φωτεινών ή σκοτεινών, ανά μονάδα μήκους.) Όταν στο φράγμα προσπέσει μονοχρωματική ακτινοβολία μήκους κύματος λ , οι φωτεινές περιοχές καθίστανται δευτερογενείς πηγές φωτός (ίδιου με το προσπίπτον φως). Το φως από όλες αυτές τις δευτερογενείς πηγές φωτός συμβάλλει, με αποτέλεσμα να σχηματιστούν κροσσοί συμβολής (μέγιστα και ελάχιστα της έντασης του φωτός). Η συνθήκη συμβολής απαιτεί η διαφορά πορείας των φωτεινών δεσμών από κάθε φωτεινή περιοχή να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Αυτό ικανοποιείται για ορισμένες τιμές της γωνίας θ για τις οποίες ισχύει:

$$d \sin \theta = n \lambda \quad (8.4)$$

όπου n είναι ένας ακέραιος αριθμός που λαμβάνει τιμές $n = 1, 2, 3, \dots$. Οι κροσσοί για $n = 1$ ονομάζονται κροσσοί πρώτης τάξης, για $n = 2$ δευτέρας τάξης κ.ο.κ.

Όταν στο φράγμα περίθλασης προσπέσει φωτεινή ακτινοβολία μεικτού φάσματος, τότε, σύμφωνα με την σχέση (8.4), κάθε συνιστώσα θα συμβάλει σε διαφορετική γωνία θ . Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το φάσμα να αναλύεται στις συνιστώσες του. Επειδή η ένταση των γραμμών μειώνεται καθώς αυξάνει η τάξη των κροσσών, η μελέτη του φάσματος γίνεται καλύτερα με την βοήθεια των κροσσών πρώτης τάξης.

Η πειραματική εργασία περιλαμβάνει:

1. Την βαθμολόγηση του φασματομέτρου.
2. Την μέτρηση των φασματικών γραμμών του νατρίου.
3. Την μέτρηση της λεπτής υφής της γραμμής D του φάσματος του νατρίου.

Πίνακας 8.2

Οι κυριότερες φασματικές γραμμές του ουδέτερου ηλίου στην ορατή περιοχή του φάσματος.

Χρώμα	λ (nm)	Μετάπτωση
Κόκκινο	667,8	$3^1 D \rightarrow 2^1 P$
Κίτρινο	587,6	$3^3 D \rightarrow 2^3 P$
Πράσινο	501,6	$3^1 P \rightarrow 2^1 S$
Μπλε - πράσινο	492,2	$4^1 D \rightarrow 2^1 P$
Μπλε	471,3	$4^3 S \rightarrow 2^3 P$
Ιώδες	447,2	$4^3 D \rightarrow 2^3 P$

A. Βαθμολόγηση του φασματομέτρου

Για να μπορέσουμε να προσδιορίσουμε το μήκος κύματος μιάς ακτινοβολίας πρέπει να βαθμολογήσουμε το σύστημα φασματοσκοπίας, δηλαδή να βρούμε την

σχέση μεταξύ του μήκους κύματος και της γωνίας θ στην σχέση (8.4). Αυτό γίνεται μελετώντας το φάσμα κάποιου στοιχείου του οποίου το φάσμα γνωρίζουμε με μεγάλη ακρίβεια. Στην άσκηση αυτή σαν τέτοιο υλικό χρησιμοποιούμε το ουδέτερο ήλιο. Στον πίνακα 8.2 παρουσιάζονται οι κύριες φασματικές γραμμές του ηλίου που βρίσκονται στην περιοχή του ορατού. Γνωρίζοντας το μήκος κύματος λ και μετρώντας την γωνία θ που εμφανίζονται οι διάφορες φασματικές γραμμές μπορούμε να προσδιορίσουμε, με την βοήθεια των ελαχίστων τετραγώνων, τις παραμέτρους της σχέσης (8.4).

B. Μελέτη των φασματικών γραμμών του νατρίου

Αντικαθιστούμε την λυχνία του ηλίου με την λυχνία του νατρίου και μετράμε την γωνία θ στην οποία παρατηρούμε κάθε γραμμή. Γνωρίζοντας την καμπύλη βαθμολογίας, σχέση (8.4), μπορούμε να βρούμε το μήκος κύματος κάθε γραμμής και, με την βοήθεια του σχήματος 8.2, μπορούμε να προσδιορίσουμε την αντίστοιχη μετάπτωση.

Γ. Λεπτή υφή της γραμμής D του νατρίου

Για να παρατηρήσουμε την λεπτή υφή της γραμμής D του νατρίου πρέπει να διαθέτουμε ένα φασματόμετρο με καλή διακριτική ικανότητα, δηλαδή ο διαχωρισμός των δύο γραμμών να είναι μεγαλύτερος από το σφάλμα της μέτρησης. Με το φράγμα περίθλασης που διατίθεται είναι δύσκολη η μέτρηση του διαχωρισμού των δύο γραμμών από τους κροσσούς πρώτης τάξης γιατί είναι περίπου ίσος με το σφάλμα της μέτρησης. Αυτό μπορεί να γίνει ευκολότερα χρησιμοποιώντας τους κροσσούς δευτέρας τάξης. Μετρώντας τις γωνίες θ_1 και θ_2 που αντιστοιχούν στις δύο συνιστώσες της γραμμής, με την βοήθεια της γνωστής πλέον σχέσης (8.4), υπολογίζουμε το μήκος κύματος των δύο γραμμών.

III. ΟΡΓΑΝΑ

1. Γωνιομετρική τράπεζα.
2. Πρίσμα.
3. Φράγμα περίθλασης.
4. Φασματικές λυχνίες ηλίου και νατρίου.
5. Τροφοδοτικό φασματικών λυχνιών.

IV. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

A. Αναγνώριση των οργάνων, ρύθμιση μηδενός

1. Αναγνωρίστε τις συσκευές.
2. Ρυθμίστε την εστίαση της διόπτρας παρατήρησης ώστε να βλέπετε καθαρά την εσωτερική κλίμακα.
3. Χωρίς να παρεμβάλετε το πρίσμα ή το φράγμα, παρατηρείστε την σχισμή της διόπτρας φωτισμού. Περιστρέψτε την διόπτρα παρατήρησης ώστε η φωτεινή γραμμή να βρίσκεται στο κέντρο της εσωτερικής κλίμακας. Χρησιμοποιείστε μία κοινή πηγή φωτός.

4. Λάβετε την ένδειξη της γωνίας από την γωνιομετρική τράπεζα και από τον βερνιέρο. Η γωνία αυτή θα χρησιμοποιηθεί από εδώ και πέρα σαν αναφορά και όλες οι γωνίες θα μετρούνται με αναφορά αυτήν την γωνία.

ΠΡΟΣΟΧΗ

Οι υποδιαίρεσεις της γωνιομετρικής τράπεζας είναι ανά μισή μοίρα. Η κλίμακα του βερνιέρου έχει 30 υποδιαίρεσεις και αντιστοιχεί, όπως είναι γνωστό, σε γωνία ίση με μιά μικρή υποδιαίρεση της κλίμακας της γωνιομετρικής τράπεζας. Κάθε υποδιαίρεση του βερνιέρου αντιστοιχεί σε γωνία ίση με 1 λεπτό της μοίρας ($= 1/60 = 0,0167^{\circ}$).

Β. Παρατήρηση ενός συνεχούς και ενός γραμμικού φάσματος

1. Τοποθετείστε με προσοχή το πρίσμα στην κατάλληλη θέση της γωνιομετρικής τράπεζας.
2. Τοποθετείστε μπροστά από την σχισμή της διόπτρας φωτισμού μιά λυχνία πυρακτώσεως.
3. Παρατηρώντας από την διόπτρα παρατήρησης, στρέψτε την σιγά – σιγά μέχρι να δείτε το φάσμα του φωτός της λυχνίας πυρακτώσεως. Πως είναι το φάσμα που βλέπετε; Ποιά είναι η διαδοχή των χρωμάτων; Ποιό χρώμα διαθλάται σε μεγαλύτερη γωνία; Γιατί;
4. Αντικαταστήστε την λυχνία πυρακτώσεως με μιά από τις φασματικές λυχνίες που έχετε.
5. Παρατηρώντας από την διόπτρα παρατήρησης, στρέψτε την σιγά – σιγά μέχρι να δείτε το φάσμα του φωτός του αερίου της φασματικής λυχνίας. Πως είναι το φάσμα που βλέπετε;
6. Συγκρίνετε και σχολιάστε τα φάσματα που παρατηρήσατε. Που οφείλονται οι διαφορές τους;

Γ. Μελέτη του φάσματος του νατρίου με φράγμα περίθλασης

1. Τοποθετείστε με προσοχή το φράγμα περίθλασης στην κατάλληλη θέση της γωνιομετρικής τράπεζας.
2. Τοποθετείστε μπροστά από την σχισμή της διόπτρας φωτισμού την λυχνία του ηλίου.

ΠΡΟΣΟΧΗ

Μην πιάνετε τις φασματικές λυχνίες με γυμνό χέρι αλλά με την βοήθεια του ειδικού πανιού. Αν τις πιάσετε με το χέρι υπάρχει κίνδυνος να καταστραφούν. Αν η λυχνία δεν βρίσκεται στην θέση της καλέστε τον υπεύθυνο της άσκησης να την τοποθετήσει. Μην προσπαθήσετε να το κάνετε μόνοι σας.

3. Παρατηρώντας από την διόπτρα παρατήρησης, στρέψτε την σιγά – σιγά μέχρι να δείτε το φάσμα του φωτός του αερίου της φασματικής λυχνίας.
4. Αναγνωρίστε κάθε φασματική γραμμή που παρατηρείτε και ταυτοποιήστε την με την βοήθεια του πίνακα 8.2.

5. Μετρήστε την γωνία για κάθε φασματική γραμμή. Εκτιμήστε το σφάλμα της μέτρησης.
6. Σχεδιάστε την καμπύλη βαθμολογίας. Ποιά είναι η μορφή της καμπύλης;
7. Με την βοήθεια των ελαχίστων τετραγώνων υπολογίστε τις παραμέτρους της καλύτερης ευθείας που διέρχεται από τα πειραματικά σας δεδομένα. Πόση είναι η σταθερά του φράγματος;. Πόσο είναι το σφάλμα της;
8. Αντικαταστήστε την λυχνία του ηλίου με την λυχνία του νατρίου.

ΠΡΟΣΟΧΗ

Μην πιάνετε τις φασματικές λυχνίες με γυμνό χέρι αλλά με την βοήθεια του ειδικού πανιού. Αν τις πιάσετε με το χέρι υπάρχει κίνδυνος να καταστραφούν. Αν η λυχνία δεν βρίσκεται στην θέση της καλέστε τον υπεύθυνο της άσκησης να την τοποθετήσει. Μην προσπαθήσετε να το κάνετε μόνοι σας.

9. Για κάθε γραμμή του φάσματος μετρήστε την γωνία στην οποία την παρατηρείτε. Υπολογίστε το μήκος κύματος και την ενέργεια της γραμμής. Πόσο είναι το σφάλμα τους;
10. Με την βοήθεια του ενεργειακού διαγράμματος του νατρίου, σχήμα 8.2, ταυτοποιείτε όλες γραμμές μπορείτε.
11. Θεωρώντας ότι $Z_{eff} = 1$, υπολογίστε τις ενέργειες των φωτονίων που αναμένονται από τις αντίστοιχες μεταπτώσεις. Συγκρίνετε τις τιμές αυτές με τις πειραματικές σας τιμές. Εξηγήστε γιατί οι θεωρητικές τιμές δεν συμφωνούν με τις πειραματικές.
12. Βρείτε και παρατηρείστε το φάσμα περίθλασης δευτέρας τάξης ($n = 2$). Βρείτε την γραμμή D του νατρίου.
13. Μετρήστε τις γωνίες κάθε συνιστώσας της γραμμής.
14. Υπολογίστε το μήκος κύματος, την ενέργειά τους και τον διαχωρισμό των γραμμών Δλ και ΔΕ.
15. Σχόλια, συμπεράσματα.