

ΑΤΟΜΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Συγγραφή – Επιμέλεια: Παναγιώτης Φ. Μοίρας

EMC²

ΑΤΟΜΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Η κβαντική θεωρία της ακτινοβολίας εισήχθη από το Γερμανό Φυσικό M. Plank με σκοπό να εξηγήσει τους νόμους που διέπουν τη θερμική ακτινοβολία των σωμάτων. Είναι γνωστό ότι τα σώματα εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία που η ένταση της είναι αύξουσα συνάρτηση της θερμοκρασίας τους. Τα πειραματικά όμως αποτελέσματα της παραπάνω συνάρτησης δεν ήταν δυνατόν να δικαιολογηθούν σύμφωνα με την κλασική θεωρία που δέχεται ότι η θερμική ενέργεια εκπέμπεται με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (συνεχές φάσμα). Έτσι το 1909 ο M. Plank στην προσπάθεια του να εξηγήσει το προαναφερόμενο φαινόμενο, εγκατέλειψε την κλασική θεωρία και διατύπωσε τις παρακάτω υποθέσεις :

α) Η με τη μορφή ακτινοβολίας εκπεμπόμενη ενέργεια δεν μπορεί να έχει οποιαδήποτε τιμή αλλά μόνο τιμές που δίνονται από τη σχέση :

$$E = n h \nu, \quad (n=1,2,\dots)$$

όπου ν είναι η συχνότητα της ακτινοβολίας και h είναι μια σταθερή που λέγεται σταθερή του Plank και ισούται με :

$$h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Joule sec}$$

β) Η με τη μορφή της ακτινοβολίας εκπεμπόμενη ενέργεια δεν εκπέμπεται συνεχώς αλλά ασυνεχώς και κατά στοιχειώδη ποσά ενέργειας που λέγονται κβάντα φωτός ή φωτόνια. Ένα φωτόνιο μονοχρωματικής ακτινοβολίας έχει ενέργεια ίση με :

$$E = h \nu$$

Έτσι σύμφωνα με τη θεωρία του Plank μια φωτεινή δέσμη συχνότητας ν αποτελείται από μεγάλο αριθμό φωτονίων που κινούνται με την ταχύτητα του φωτός και καθένα έχει ενέργεια $E = h \nu$. Με αυτή τη θεωρία εξηγήθηκαν μεταγενέστερα το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και το φαινόμενο Compton.

ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ COMPTON

Αν πάνω σε ένα υλικό, που κατά προτίμηση έχει μικρή ατομική μάζα, προσπέσει ακτινοβολία Rontgen, το υλικό γίνεται πηγή δευτερογενούς ακτινοβολίας που εκπέμπεται προς όλες τις διευθύνσεις (σκέδαση) και συγχρόνως ξεφεύγουν ηλεκτρόνια από το υλικό. Αν η προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι μονοχρωματική συχνότητας ν_1 και μετρήσουμε τη συχνότητα ν_2 της ακτινοβολίας που σκεδάστηκε θα βρούμε ότι $\nu_2 < \nu_1$. Αυτό το φαινόμενο λέγεται **φαινόμενο Compton** και τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από το υλικό λέγονται **ηλεκτρόνια Compton**.

Σύμφωνα με την κβαντική θεωρία αυτό το φαινόμενο είναι αποτέλεσμα της ελαστικής κρούσης ενός φωτονίου μ' ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο. Μετά αυτή την κρούση το φωτόνιο, που είχε συχνότητα ν_1 , κινείται προς άλλη κατεύθυνση έχοντας συχνότητα ν_2 , όπου $\nu_2 < \nu_1$. Η ενέργεια που έχασε το φωτόνιο $h(\nu_1 - \nu_2)$ έχει αποδοθεί σαν κινητική ενέργεια στο εξερχόμενο από το υλικό ηλεκτρόνιο. Δηλαδή ισχύει η σχέση :

$$h \cdot \nu_1 = h \cdot \nu_2 + \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

όπου m και v είναι η μάζα και η ταχύτητα του εξερχόμενου από το υλικό ηλεκτρονίου.

ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΚΑΙ ΙΟΝΙΣΜΟΣ ΑΤΟΜΟΥ

Διέγερση ατόμου είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ένα ηλεκτρόνιο μεταπηδάει από τη θεμελιώδη τροχιά του σε μια άλλη τροχιά με μεγαλύτερη στάθμη ενέργειας, επειδή έλαβε ενέργεια από κάποιο εξωτερικό αίτιο. Η πρόσληψη της ενέργειας μπορεί να γίνει ή με κρούση ή με ακτινοβολία ή με προσφορά θερμότητας. Η ενέργεια που απαιτείται για τη παραπάνω μεταφορά του ηλεκτρονίου, λέγεται **έργο διέγερσης**. Η κατάσταση διέγερσης δεν είναι ευσταθής και μετά από περίπου 10^{-8} sec το ηλεκτρόνιο επανέρχεται στην αρχική του τροχιά εκπέμποντας ένα φωτόνιο. Η επιστροφή στη θεμελιώδη τροχιά δεν είναι απαραίτητο να γίνει μ' ένα άλμα.

Ιονισμός ατόμου είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ένα άτομο χάνει ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια. Η ενέργεια που απαιτείται για να απομακρυνθεί ένα ηλεκτρόνιο από το άτομο λέγεται **έργο ιονισμού**. Η πρόσληψη της ενέργειας αυτής γίνεται όπως και στην περίπτωση του φαινομένου της διέγερσης. Τα άτομα δεν παραμένουν για πολύ ιονισμένα, αλλά σε διάστημα μερικών δεκάτων του δευτερολέπτου συναντώνται με ηλεκτρόνια και γίνονται πάλι ηλεκτρικά ουδέτερα (επανασύνδεση).

ΚΒΑΝΤΙΚΟΙ ΑΡΙΘΜΟΙ

Οι κβαντικοί αριθμοί είναι τέσσερις : ο **κύριος κβαντικός αριθμός n** , ο οποίος καθορίζει την ενέργεια του ηλεκτρονίου στις στάθμες (ή φλοιούς) και είναι $n=1,2,3,\dots$, ο **δευτερεύοντας κβαντικός αριθμός l** , που καθορίζει την στροφορμή του πλανητικού ηλεκτρονίου και είναι $l=0,1,2,3,\dots,n-1$, ο **μαγνητικός κβαντικός αριθμός της τροχιακής στροφορμής m_l** ($m_l=0,\pm 1,\pm 2,\dots$) που καθορίζει τον προσανατολισμό της τροχιάς των πλανητικών ηλεκτρονίων όταν βρίσκονται σε ένα ηλεκτρικό ή μαγνητικό πεδίο και ο **μαγνητικός κβαντικός αριθμός της ιδιοστροφορμής m_s** ($m_s = \pm 1/2$), που καθορίζει την κατεύθυνση της ιδιοστροφορμής (spin) πάνω στην διεύθυνση του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού ή μαγνητικού πεδίου. Οι τέσσερις αυτοί κβαντικοί αριθμοί περιγράφουν όλοι μαζί την κατάσταση του ηλεκτρονίου στο άτομο, δηλαδή τον τρόπο που κινείται αυτό γύρω από τον πυρήνα.

ΑΚΤΙΝΕΣ RONTGEN (X)

1. Φύση των ακτινών Rontgen

Όταν ηλεκτρόνια μεγάλης ταχύτητας προσπέσουν πάνω σε ύλη, παράγονται ακτίνες Rontgen. Αυτές οι ακτίνες ανακαλύφθηκαν το 1895 από τον W.C. Rontgen και αρχικά ονομάστηκαν ακτίνες – X. Σήμερα όμως λέγονται συνήθως ακτίνες Rontgen προς τιμή αυτού που τις παρατήρησε πρώτος.

Για είκοσι και περισσότερα χρόνια δεν υπήρχε απάντηση για τη φύση αυτών των ακτινών και μόνο το 1912 ο Laue απόδειξε ότι οι ακτίνες Rontgen έχουν την ίδια φύση με τις φωτεινές ακτίνες, δηλ. είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Η διαφορά τους σε σχέση με τις φωτεινές ακτίνες είναι το ότι έχουν πάρα πολύ μικρό μήκος κύματος. Το μήκος κύματος αυτών είναι πολύ μικρότερο και από το μήκος κύματος των ιωδών ακτινών του ορατού φάσματος, δηλ. είναι αόρατες.

2. Διατάξεις παραγωγής ακτινών Rontgen

Οι διατάξεις παραγωγής ακτινών Rontgen διακρίνονται, ανάλογα με την προέλευση των ηλεκτρονίων που τις προκαλούν, σε δυο κατηγορίες :

α) Σωλήνες Coolidge

Είναι σωλήνες ψηλού κενού. Τα απαραίτητα ηλεκτρόνια παράγονται από θερμαινόμενη κάθοδο και σαν στόχος χρησιμεύει η άνοδος A. Η άνοδος A, που λέγεται και αντικάθοδος, συνίσταται συνήθως από βολφράμιο και αποθεμαίνεται κατάλληλα. Μεταξύ ανόδου – καθόδου εφαρμόζεται τάση $5 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^6$ volts για να επιτευχθεί η κατάλληλη ταχύτητα των ηλεκτρονίων.

β) Ιοντικοί σωλήνες (σωλήνες Crookes)

Είναι σωλήνες που περιέχουν αέριο με μικρή πίεση (περίπου 10^{-3} Torr). Η κάθοδος έχει σχήμα κοίλου δίσκου και αποτελείται συνήθως από αργίλιο. Η άνοδος είναι μικρός δίσκος από δύστηκτο μέταλλο, π.χ. βολφράμιο, που επικάθεται πάνω σε ηλεκτρόδιο χαλκού, το οποίο ψύχεται με κυκλοφορία υγρού. Το χρησιμοποιούμενο υγρό συνήθως είναι νερό ή πετρέλαιο. Όταν μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων εφαρμοστεί η κατάλληλη τάση (μερικές χιλιάδες Volts), ξεσπάει αυτοτελής εκκένωση που προκαλεί την παραγωγή

ηλεκτρονίων. Τα παραγόμενα ηλεκτρόνια επιταχύνονται από την τάση που υπάρχει μεταξύ των ηλεκτροδίων και προσπίπτουν πάνω στην άνοδο. Με κατάλληλες τεχνικές μπορούμε να διατηρήσουμε την πίεση του αερίου μέσα στον σωλήνα σε επιθυμητά όρια.

3. Μέθοδοι παρατήρησης των ακτινών Rontgen

Όπως αναφέραμε στα προηγούμενα οι ακτίνες Rontgen είναι αόρατες γιατί είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα με μήκος κύματος πολύ μικρό, που δεν ανήκει στην περιοχή του ορατού ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Έτσι για να παρατηρηθούν χρειάζονται ειδικές διατάξεις που η λειτουργία τους στηρίζεται στις ιδιότητες των ακτινών Rontgen. Τέτοιες διατάξεις είναι :

α) Φθορίζοντα διαφράγματα.

Ορισμένα υλικά, όπως π.χ. το CaCO_3 , όταν προσβάλλονται από τις ακτίνες Rontgen, φθορίζουν, δηλαδή γίνονται πηγές δευτερογενούς ακτινοβολίας που είναι ορατή.

β) Φωτογραφικές πλάκες

Όπως το φως έτσι και οι ακτίνες Rontgen προσβάλλουν τις φωτογραφικές πλάκες. Σημειώνεται ότι οι χρησιμοποιούμενες για αυτή την περίπτωση φωτογραφικές πλάκες φέρουν φωτοπαθή ουσία και στις δύο πλευρές για να έχουν διπλάσια ευαισθησία.

γ) Θάλαμοι ιονισμού.

4. Φάσματα των ακτινών Rontgen

Αν εξετάσουμε με τη χρήση κατάλληλου φασματογράφου το φάσμα των ακτινών Rontgen, θα παρατηρήσουμε ότι το φάσμα τους είναι σύνθετο. Πιο συγκεκριμένα αποτελείται από ένα γραμμικό φάσμα που επικάθεται πάνω σ' ένα συνεχές φάσμα.

Το γραμμικό φάσμα οφείλεται στην ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα άτομα του υλικού της αντικαθόδου, λόγω της πρόσκρουσης πάνω σ' αυτή των ηλεκτρονίων (Διέγερση). Σημειώνεται ότι τα εκπεμπόμενα φωτόνια κατά την επιστροφή των ηλεκτρονίων στις δημιουργούμενες από το φαινόμενο της διέγερσης «οπές» είναι ορισμένης συχνότητας. Η συχνότητα αυτή δίνεται από

το νόμο του Moseley. Το γραμμικό φάσμα αποτελείται από πολλές γραμμές και αυτό, γιατί όπως είναι γνωστό η συμπλήρωση των «οπών» μπορεί να γίνει από πολλά ηλεκτρόνια αρκεί αυτά να κινούνται σε τροχιές μεγαλύτερης ενέργειας από την τροχιά της «οπής». Το συνεχές φάσμα οφείλεται στην απότομη ελάττωση της ταχύτητας (αρνητική επιτάχυνση) των ηλεκτρονίων που προσπίπτουν πάνω στην αντικάθοδο. Η απότομη αυτή ελάττωση της ταχύτητας έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή μη περιοδικού ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Είναι γνωστό ότι τα μη περιοδικά κύματα αναλυόμενα κατά Fourier δίνουν συνεχές φάσμα.

Μελετώντας τη φωτομετρική καμπύλη, παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει φωτόνιο με ενέργεια μεγαλύτερη μιας τιμής. Αυτό βέβαια οφείλεται στο ότι η ενέργεια του φωτονίου εξαρτάται από την κινητική ενέργεια του προσπίπτοντος ηλεκτρονίου, δηλαδή για την οριακή συχνότητα ν_{op} ισχύει :

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu_{op}$$

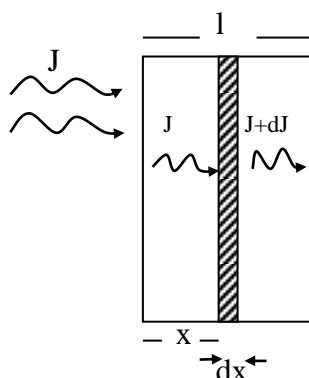
όπου $\frac{1}{2}mv^2$ είναι η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου και $h\nu_{op}$ είναι η ενέργεια του φωτονίου. Η οριακή συχνότητα ν_{op} βρίσκεται από το οριακό μήκος κύματος λ_{op} . Σύμφωνα μ' αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω το φάσμα των ακτινών Rontgen επηρεάζεται από τους εξής παράγοντες:

- α) Από τον αριθμό των ηλεκτρονίων που προσπίπτουν στη μονάδα χρόνου στην αντικάθοδο.
- β) Από την ταχύτητα των ηλεκτρονίων.
- γ) Από το υλικό της αντικαθόδου και συγκεκριμένα από τον ατομικό αριθμό του υλικού.

5. Εξασθένηση των ακτίνων Rontgen

Οι ακτίνες Rontgen, όταν διέρχονται μέσα από οποιοδήποτε υλικό, παθαίνουν εξασθένηση που οφείλεται κατά κύριο λόγο στην απορρόφηση και την σκέδαση των φωτονίων τους από τα άτομα του υλικού. Αποδεικνύεται πειραματικά ότι η σχέση που περιγράφει την εξασθένηση είναι :

$$dJ = -\mu J dx$$



Σχ. Μεταβολή της έντασης της ακτινοβολίας

Ο συντελεστής μ λέγεται γραμμικός συντελεστής εξασθένησης και εξαρτάται από τη φύση του υλικού και τη συχνότητα της ακτινοβολίας. Το αρνητικό σημείο τίθεται στη σχέση, γιατί η αρχική ένταση J της ακτινοβολίας παθαίνει μέσα στο υλικό πάχους dx ελάττωση dJ .

Αν ολοκληρώσουμε τη σχέση προκύπτει :

$$J = J_0 e^{-\mu l}$$

όπου J , J_0 είναι η τελική και η αρχική αντίστοιχα ένταση της ακτινοβολίας και l είναι το πάχος του υλικού. Παρατηρούμε ότι επειδή τα μ , l είναι θετικοί, το $e^{-\mu l}$ είναι πάντα μικρότερο της μονάδας, δηλαδή ισχύει πάντα $J < J_0$.

Παρατηρούμε ότι για μικρά μ έχουμε μικρή εξασθένηση (σκληρή ακτινοβολία), ενώ για μεγάλα μ έχουμε μεγάλη εξασθένηση (μαλακή ακτινοβολία). Σκληρές ακτίνες Rontgen λέγονται οι ακτίνες μικρού μήκους

κύματος, γιατί απορροφούνται λιγότερο. Αντίθετα, μαλακές ακτίνες Rontgen λέγονται οι μεγάλοι μήκους κύματος, γιατί απορροφούνται ευκολότερα.

6. Εφαρμογές ακτινών Rontgen

Οι ακτίνες Rontgen χρησιμοποιούνται :

α) Βιολογία – Ιατρική (Ακτινοδιαγνωστική – Ακτινογραφία – Ακτινοθεραπεία κλπ.)

β) Έρευνα για την υφή των στερεών σωμάτων (Μεταλλουργία κλπ.)

γ) Έρευνα για την κρυσταλλική δομή του στερεού σώματος. Αυτή γίνεται με διάφορους μεθόδους. Οι σπουδαιότερες είναι η μέθοδος του Bragg, η μέθοδος Debye – Scherrer και η μέθοδος Laue.

ΑΣΚΗΣΕΙΣ

ΑΣΚΗΣΗ 1

Να υπολογιστεί η σχέση μεταξύ του γραμμικού συντελεστή εξασθένηση μ και του πάχους υποδιπλασιασμού $1_{1/2}$.

ΑΣΚΗΣΗ 2

Δύο δέσμες ακτινών Rontgen που έχουν την ίδια αρχική ένταση εισέρχονται σε φύλλο αλουμινίου πάχους 2mm. Αν ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης για τη μια δέσμη είναι $\mu_1=13,5 \text{ cm}^{-1}$ και για την άλλη είναι $\mu_2 = 0,75 \text{ cm}^{-1}$, να υπολογισθεί ο λόγος των εντάσεων των ακτινοβολιών που εξέρχονται από το προαναφερόμενο φύλλο Αλουμινίου.