

## Άσκηση 1 : ΣΚΕΔΑΣΗ COMPTON

### Σκοπός

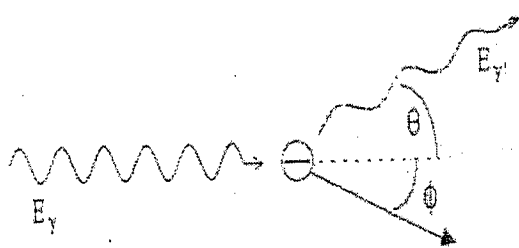
Χρησιμοποιώντας τα φάσματα ακτίνων-γ από διάφορες ραδιενεργές πηγές και με τη βοήθεια του φαινομένου Compton, θα μετρήσετε τη μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου καθώς και την μεταβολή της κινητικής και ολικής σχετικιστικής ενέργειας συναρτήσει της ταχύτητας του ηλεκτρονίου.

### Εισαγωγή

Το φαινόμενο Compton αφορά στη σκέδαση φωτονίων από ατομικά ηλεκτρόνια. Μετά τη σκέδαση ένα μέρος της ενέργειας του φωτονίου  $E_\gamma$  μεταφέρεται στο ηλεκτρόνιο με τη μορφή κινητικής ενέργειας. Το φωτόνιο αποκτά διαφορετική συχνότητα, και επομένως ενέργεια  $E_{\gamma'}$ . Κατά την αλληλεπίδραση ισχύει η διατήρηση της σχετικιστικής μάζας-ενέργειας και ορμής. Η σχέση μεταξύ της ενέργειας των φωτονίων πριν και μετά την κρούση δίδεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{E_{\gamma'}} - \frac{1}{E_\gamma} = \frac{1 - \cos\theta}{m_e c^2} \quad (1.1)$$

όπου  $m_e c^2$  είναι η μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου (511 keV) και  $\theta$  η γωνία σκέδασης του φωτονίου. Ένα διάγραμμα της σκέδασης Compton φαίνεται στο σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1 : Σκέδαση Compton μεταξύ προσπίπτοντος φωτονίου  $E_\gamma$  και ακίνητου ηλεκτρονίου.

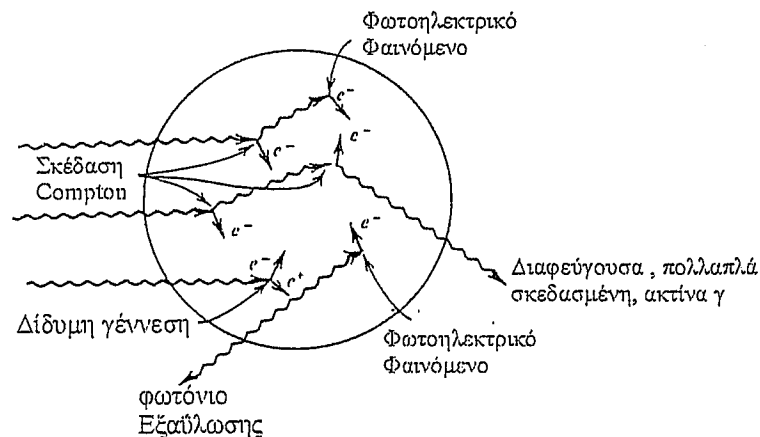
Η κρούση έχει ως αποτέλεσμα ένα χαμηλότερης ενέργειας φωτόνιο  $E_{\gamma'}$  το οποίο σκεδάζεται υπό γωνία  $\theta$ , και ένα ηλεκτρόνιο που σκεδάζεται υπό γωνία  $\phi$ .

### Μέθοδος

Στην εργαστηριακή σας άσκηση, τα φωτόνια είναι ακτίνες-γ από την αποδιέγερση ραδιενεργών πηγών. Για την ανίχνευση των ακτίνων-γ χρησιμοποιείται κρύσταλλος σπινθιρισμών NaI με τον οποίο οι ακτίνες-γ αλληλεπιδρούν (μέσω φωτοηλεκτρικού φαινομένου, φαινομένου Compton και δίδυμης γέννησης) και παράγουν ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτόνια αυτά διανύουν μια μικρή ακανόνιστη τροχιά στον κρύσταλλο, συγκρούονται με πολλά άτομα του κρυστάλλου και μετατρέπουν την

ενέργειά τους σε ορατά φωτόνια. Όσο μεγαλύτερη ενέργεια έχει η ακτίνα γάμμα, τόσο περισσότερα φωτόνια παράγονται. Στη συνέχεια ο φωτοπολλαπλασιαστής (PMT) μετατρέπει κάθε φωτόνιο σε ένα μικρό ρεύμα, και επειδή τα φωτόνια φθάνουν στον φωτοπολλαπλασιαστή την ίδια περίπου χρονική στιγμή, τα στοιχειώδη ρεύματα αθροίζονται και δίνουν ένα συνιστάμενο ηλεκτρικό παλμό. Αυτός ο παλμός μετατρέπεται σε παλμό τάσης, το μέγεθος του οποίου είναι ανάλογο με την ενέργεια της αρχικής ακτίνας γάμμα.

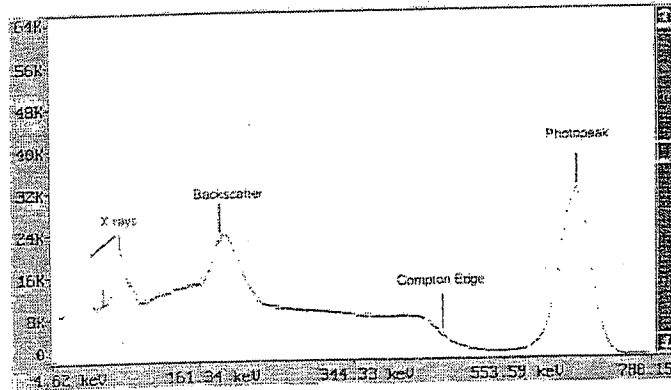
Στην περίπτωση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, όλη η ενέργεια της ακτίνας-γ μεταφέρεται σε ένα ηλεκτρόνιο, ενώ στο φαινόμενο Compton το παραγόμενο ηλεκτρόνιο έχει μικρότερη ενέργεια και η σκεδαζόμενη ακτίνα-γ μπορεί να επαναλάβει την ίδια διαδικασία ή και να διαφύγει από τον κρύσταλλο, με αποτέλεσμα τα παραγόμενα ηλεκτρόνια Compton να εμφανίζουν μια κατανομή ενέργειας. Παράδειγμα τέτοιων αλληλεπιδράσεων που μπορεί να συμβούν όταν μια ακτίνα-γ προσπέσει σε κρύσταλλο σπινθηρισμών NaI, παρουσιάζεται στο Σχ.1.2.



**Σχήμα 1.2** Σχηματική παράσταση των αλληλεπιδράσεων που μπορούν να συμβούν κατά την ανίχνευση ακτίνων-γ από κρύσταλλο σπινθηρισμών NaI.

Εαν για παράδειγμα πάρετε το φάσμα μιας πηγής  $^{137}\text{Cs}$ , εφόσον το  $^{137}\text{Cs}$  εκπέμπει μόνο μια ακτίνα γ, το φάσμα θα πρέπει να έχει μόνο μια φωτοκορυφή στα 661.6 KeV. Στην πραγματικότητα όμως, όπως φαίνεται και στο Σχ. 1.3 υπάρχουν και κάποιες άλλες κορυφές στο φάσμα, όπως μια αιχμή στα 477 KeV περίπου, που έχει σημειωθεί ως αιχμή Compton (Compton edge).

Ποιά είναι η προέλευση της κορυφής Compton στα 477 KeV; Μία ακτίνα γ μπαίνει στον κρύσταλλο του ανιχνευτή και ελευθερώνει με Compton ένα ηλεκτρόνιο. Αν η σκεδαζόμενη ακτίνα γ εγκαταλείψει τον κρύσταλλο, τότε η ανιχνεύσιμη ενέργεια είναι η κινητική ενέργεια που αποκτά το ηλεκτρόνιο. Η μέγιστη κινητική ενέργεια που αποκτά το



Σχήμα 1.3. Φάσμα πηγής  $^{137}\text{Cs}$ . Ο οριζόντιος άξονας δίδεται σε keV.

ηλεκτρόνιο,  $E_{max}^e$  προκύπτει από μετωπική σύγκρουση του ηλεκτρονίου με την ακτίνα  $\gamma$ , που έχει σαν αποτέλεσμα την οπισθοσκέδαση της ακτίνας  $\gamma$  κατά γωνία  $\theta=180^\circ$ . Από την εξίσωση 1.1 η μέγιστη προσλαμβανόμενη ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι:

$$E_{max}^e = E_\gamma - E_{\gamma'} = \frac{2E_\gamma^2}{2E_\gamma + m_e c^2} \quad (1.2)$$

Η αιχμή *Compton* αναπαριστά αυτή την μέγιστη ενέργεια που μεταφέρεται στο ηλεκτρόνιο. Βέβαια, το ηλεκτρόνιο μπορεί να υπόκειται σε μια πιά ήπια κρούση, και να έχει μικρότερη ενέργεια από την  $E_{max}^e$  μετά την κρούση. Από τις διαδικασίες αυτές προκύπτει μια ευρεία κατανομή γεγονότων σε ενέργειες μικρότερες από την αιχμή *Compton* που εμφανίζονται στο φάσμα σαν υψηλό υπόβαθρο.

Στο φάσμα όμως του Σχ.1.3 εμφανίζονται άλλες δυο κορυφές, η μια προέρχεται από τις ακτίνες-X που παράγονται από τον θυγατρικό πυρήνα  $^{137}\text{Ba}$  και η άλλη, που εμφανίζεται στα  $\sim 185\text{keV}$ , οφείλεται στη σκέδαση *Compton* των ακτίνων- $\gamma$  με τα ηλεκτρόνια των υλικών που περιβάλλουν τον κρύσταλλο NaI. Η δεύτερη αυτή κορυφή ονομάζεται κορυφή οπισθοσκέδασης *Compton* και στο φάσμα αναγράφεται ως backscatter. Στην περίπτωση αυτή για γωνίες σκέδασης *Compton* περί τις  $180^\circ$ , τα ηλεκτρόνια οπισθοσκεδάζονται και διαφεύγουν εκτός του κρυστάλλου, ενώ οι ακτίνες- $\gamma$  μέσω φωτοηλεκτρικού φαινομένου ανιχνεύονται από τον κρύσταλλο και δίνουν στο φάσμα τη φωτοκορυφή οπισθοσκέδασης *Compton* χαμηλής ενέργειας  $E_{BS}$ .

Οι δυο αυτές ειδικές περιπτώσεις σκέδασης *Compton* σε γωνίες  $180^\circ$  που προαναφέρθηκαν, είναι συμμετρικές μεταξύ τους. Κατά τη διαδικασία που αντιστοιχεί στην αιχμή *Compton* η ακτίνα- $\gamma$  οπισθοσκεδάζεται και εγκαταλείπει τον κρύσταλλο, ενώ το ηλεκτρόνιο αποκτά ενέργεια  $E_{max}^e$  η οποία και ανιχνεύεται. Στη διαδικασία της οπισθοσκέδασης *Compton* το ηλεκτρόνιο οπισθοσκεδάζεται και εγκαταλείπει τον κρύσταλλο, ενώ η ακτίνα- $\gamma$  ανιχνεύεται με ενέργεια  $E_{BS}$ . Είναι προφανές επομένως ότι :

$$E_{BS} + E_{max}^e = E_{\gamma} \quad (1.3)$$

## Εξοπλισμός

1. Ανιχνευτής  $NaI(Tl)$  με  $MCA$
2. Ραδιενεργές πηγές:  $^{54}Mn$ ,  $^{65}Zn$ ,  $^{137}Cs$ ,  $^{22}Na$ ,  $^{60}Co$

## Πειραματική διαδικασία

1. Βαθμονομείστε τον ανιχνευτή με τις πηγές  $^{22}Na$  και  $^{54}Mn$ . Ρυθμίστε την ενίσχυση για να συμπεριλάβετε τη μέγιστη ενέργεια που είναι περίπου 1400 KeV. Επιβεβαιώστε την βαθμονόμησή σας με την πηγή  $^{137}Cs$ .
2. Τοποθετείστε μια ραδιενεργό πηγή κοντά στον ανιχνευτή. Συλλέξτε το φάσμα της και καταγράψτε σε πίνακα την ενέργεια της κύριας φωτοκορυφής, της αιχμής *Compton* και της οπισθοσκέδασης *Compton*. Η αιχμή *Compton* προσδιορίζεται περίπου στο μισό του μέγιστου του βήματος στο φάσμα, ενώ η ενέργεια της κορυφής οπισθοσκέδασης αντιστοιχεί στη χαμηλότερη περιοχή του μέγιστου της κορυφής, όπως φαίνεται και στο Σχ. 2.1. Συνεχίστε με τις υπόλοιπες διαθέσιμες πηγές. Καταγράψτε σε πίνακα τις ενέργειες που προσδιορίσατε καθώς και τα σφάλματα που εκτιμήσατε.

## Επεξεργασία των δεδομένων

1. Να ελέγξετε τις μετρήσεις ενέργειας  $E_{\gamma}$ ,  $E_{max}^e$  και  $E_{BS}$  σε κάθε φάσμα και να επιβεβαιώσετε τη σχέση 1.3. Καταγράψτε τις τιμές σας σε πίνακα.
2. Να αποδείξετε την εξίσωση 1.2 και να τη λύσετε ως προς  $m_e c^2$  συναρτήσει των  $E_{\gamma}$  και  $E_{max}^e$ .
3. Χρησιμοποιώντας την ενέργεια της φωτοκορυφής και την ενέργεια της αιχμής *Compton* υπολογίστε την ενέργεια ηρεμίας του ηλεκτρονίου για όλες τις φωτοκορυφές. Βρείτε τη μέση τιμή της ενέργειας ηρεμίας και την τυπική απόκλιση της μέσης τιμής και συγκρίνετε το αποτέλεσμα σας με την αναμενόμενη τιμή.
4. Από την κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων  $E_{max}^e$  που μετρήσατε και την ενέργεια ηρεμίας που προσδιορίσατε πειραματικά, υπολογίστε την ολική σχετικιστική ενέργεια των ηλεκτρονίων για κάθε περίπτωση, καθώς και την ταχύτητα  $\beta=v/c$ . Επίσης υπολογίστε την κλασικά αναμενόμενη τιμή της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων και καταγράψτε τις τιμές σας σε πίνακα.
5. Παραστείστε γραφικά την εξάρτηση της ολικής σχετικιστικής ενέργειας, της κινητικής ενέργειας και της κλασικής κινητικής ενέργειας από την ταχύτητα. Σχολιάστε τα αποτελέσματα.