



## Μελέτη της ακτινοβολίας $\gamma$ με τη βοήθεια απαριθμητή Geiger - Muller

### 1. Σκοπός

Στην άσκηση αυτή γίνεται μελέτη της εξασθένησεως της ακτινοβολίας  $\gamma$  (ραδιενεργός πηγή  $\text{Co} - 60$ ) με την βοήθεια απαριθμητή (ή ανιχνευτή) Geiger - Muller. Χρησιμοποιώντας συγκεκριμένου τύπου απορροφητή (ή απορροφητές) υπολογίζεται πειραματικά ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησεως και συγκρίνεται με τον αντίστοιχο της βιβλιογραφίας. Υπολογίζεται επίσης το πάχος υποδιπλασιασμού για τον (ή τους) εν λόγω απορροφητές.

### 2. Θεωρία

Η ακτινοβολία  $\gamma$  είναι ηλεκτρομαγνητικής φύσεως και έχει πολύ μεγάλη εμβέλεια σε όλα σχεδόν τα υλικά. Η εξασθένησή της σε κάθε απορροφητή είναι τελικά το αθροιστικό αποτέλεσμα τριών κυρίως μηχανισμών αλληλεπίδρασης :

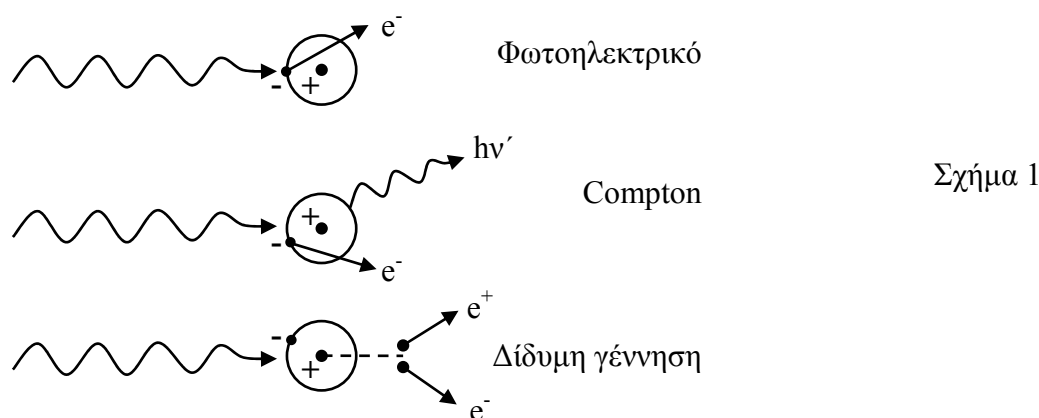
1. Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο : Αυτή η αλληλεπίδραση είναι περισσότερο σπουδαία για μικρής σχετικά ενέργειας φωτόνια σε υλικά μεγάλου ατομικού αριθμού  $Z$ . Πρόκειται για την απομάκρυνση ατομικών ηλεκτρονίων που προκαλείται από τα φωτόνια της ακτινοβολίας  $\gamma$  η οποία και απορροφάται πλήρως από το άτομο.
2. Φαινόμενο Compton : Αυτό το φαινόμενο κυριαρχεί σε ενεργειακές περιοχές ακτινοβολίας  $\gamma$  από 1 έως 5 MeV και σε υλικά επίσης μεγάλου ατομικού αριθμού. Πρόκειται για το φαινόμενο στο οποίο το φωτόνιο  $\gamma$  εκδιώκει ένα ηλεκτρόνιο από το άτομο του απορροφητή, ενώ παράλληλα δημιουργείται και ένα νέο φωτόνιο μικρότερης όμως ενέργειας. Τέλος,
3. Δίδυμη γέννηση : Πρόκειται για την πλήρη απορρόφηση φωτονίων (με ενέργεια όμως μεγαλύτερη από 1.1 MeV) στο πυρηνικό δυναμικό ενός ατόμου του απορροφητή. Η «εξαφάνιση» αυτή συνοδεύεται με την ταυτόχρονη δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου - ποζιτρονίου, ( $e^-$ ,  $e^+$ ) τα οποία και αυτά με την σειρά τους απορροφούνται προκαλώντας ιονισμό στο πέρασμά τους μέσα από τον συγκεκριμένο απορροφητή.

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται σχηματικά οι τρεις μηχανισμοί που προαναφέρθηκαν ως οι κύριοι υπεύθυνοι για την εξασθένηση της ακτινοβολίας  $\gamma$  κατά την διέλευσή της μέσα από το στρώμα κάποιου απορροφητή.

Η ακτινοβολία  $\gamma$  λοιπόν υφίσταται κάποια απορρόφηση, όταν διέρχεται μέσω της ύλης. Συγκεκριμένα η μεταβολή  $dJ$  της έντασης που υφίσταται η ακτινοβολία αυτή όταν διαπερνά στρώμα απορροφητή πάχους  $dx$  είναι ανάλογη της προσπίπτουσας έντασης  $J$  και του πάχους  $dx$ , δηλαδή ισχύει :

$$dJ = -\mu J dx$$

Στην σχέση αυτή ο συντελεστής  $\mu$  είναι ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησεως και



εξαρτάται από τη φύση του απορροφητή και την ενέργεια  $E = h\nu$  των φωτονίων της ακτινοβολίας. Εύκολα αποδεικνύεται ότι σε βάθος  $x$  εντός του απορροφητή η ένταση είναι :

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

Όπου  $J_0$  είναι η αρχική ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Η προηγούμενη σχέση δηλώνει ότι η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας – ελαττώνεται εκθετικά σε σχέση με το βάθος διείσδυσης. Για έναν απορροφητή έχει μεγάλη σημασία να γνωρίζουμε το πάχος υποδιπλασιασμού του  $I_{1/2}$ , δηλαδή το πάχος του αναγκαίου στρώματος, ώστε αυτό να ελαττώνει την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο μισό.

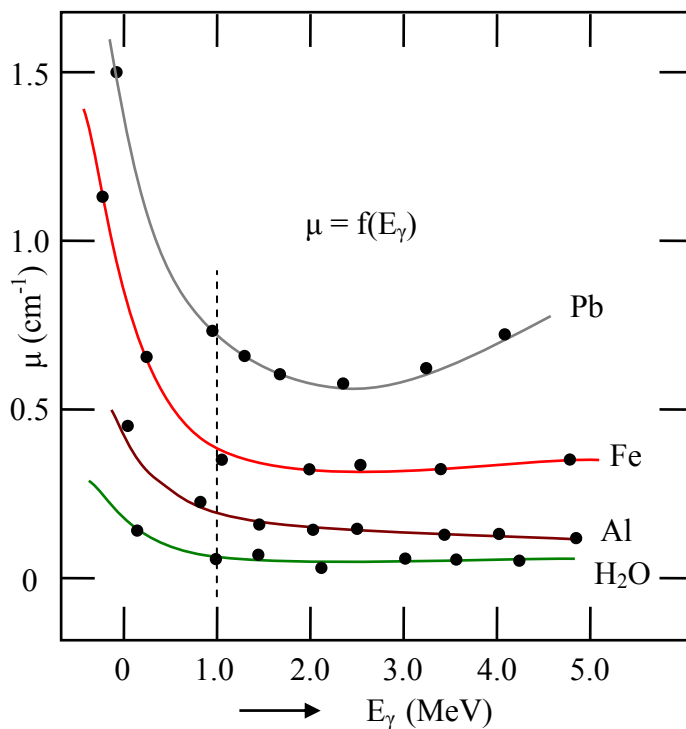
Βέβαια για  $J = J_0 / 2$  θα ισχύει :  $J_0 / 2 = J_0 e^{-\mu I_{1/2}}$  ή τελικά  $\ln 2 = \mu I_{1/2}$  με αποτέλεσμα το :

$$I_{1/2} = 0.69 / \mu$$

Από την τελευταία σχέση φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησεως, τόσο μικρότερο είναι το πάχος υποδιπλασιασμού για τον συγκεκριμένο βέβαιο απορροφητή. Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται συνοπτικά η μεταβολή του γραμμικού συντελεστή εξασθένησεως  $\mu$  (σε  $\text{cm}^{-1}$ ) για διάφορους συνηθισμένους απορροφητές. Οι τιμές έχουν ληφθεί από αντίστοιχη βιβλιογραφία και αφορούν την ενεργειακή περιοχή  $\gamma$  – ακτινοβολίας από 0 έως 5,0 MeV.

Για παράδειγμα στην ακτινοβολία –  $\gamma$  ενέργειας 1.0 MeV ο μόλυβδος (Pb) εμφανίζει ένα γραμμικό συντελεστή  $0.77 \text{ cm}^{-1}$ , ενώ ο αντίστοιχος του αλουμινίου (Al) είναι περίπου 5 φορές μικρότερος, έχει δηλαδή τιμή  $0.16 \text{ cm}^{-1}$ .

Εκτός όμως από τον γραμμικό συντελεστή εξασθένησεως  $\mu$  στην πράξη χρησιμοποιείται και ο αντίστοιχος μαζικός συντελεστής  $\kappa$  που ικανοποιεί την σχέση  $\mu = \kappa \rho$  όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του απορροφητή ( $\rho = m / V$ ).

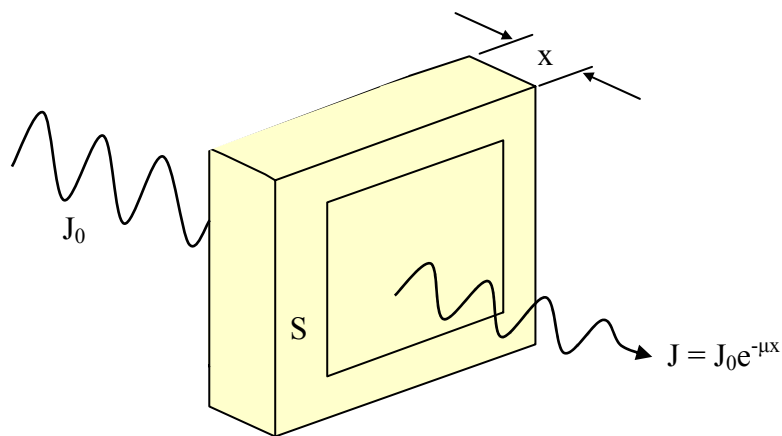


Σχήμα 2. Μεταβολή γραμμικού συντελεστή εξασθένησης  $\mu$  για διάφορα υλικά απορρόφησης

Για φύλλο απορροφητή σταθερού πάχους  $x$  και εμβαδού  $S$  θα ισχύει

$$J = J_0 e^{-\mu x} = J_0 e^{-\kappa \sigma}$$

Όπου  $\sigma = m / S$  είναι η επιφανειακή πυκνότητα του υλικού του απορροφητή και εκφράζει την περιεχόμενη μάζα ανά μονάδα επιφάνειας.



Σχήμα 3

Η τελευταία σχέση  $J = J_0 e^{-\kappa \sigma}$  και μάλιστα υπό την μορφή :

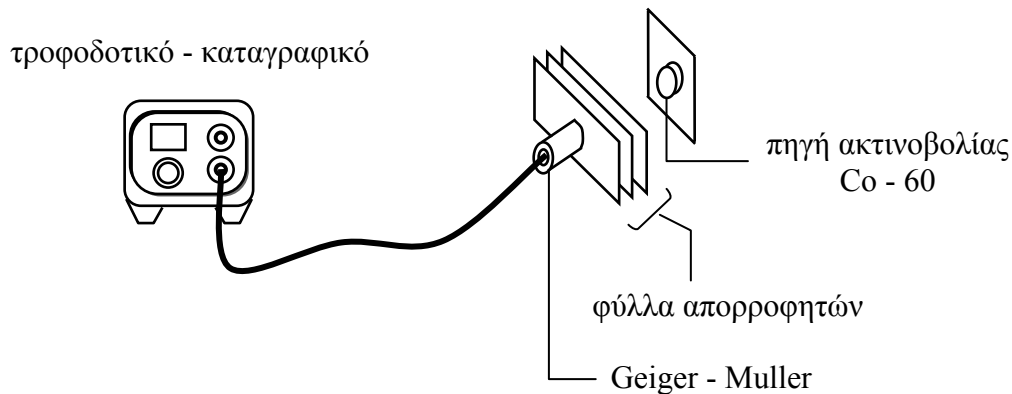
$$\ln (J / J_0) = - \kappa \sigma$$

είναι αυτή που η άσκηση χρησιμοποιεί με σκοπό τον πειραματικό προσδιορισμό του μαζικού συντελεστή  $\kappa$  για τον συγκεκριμένο απορροφητή.

### 3. Πειραματική διαδικασία

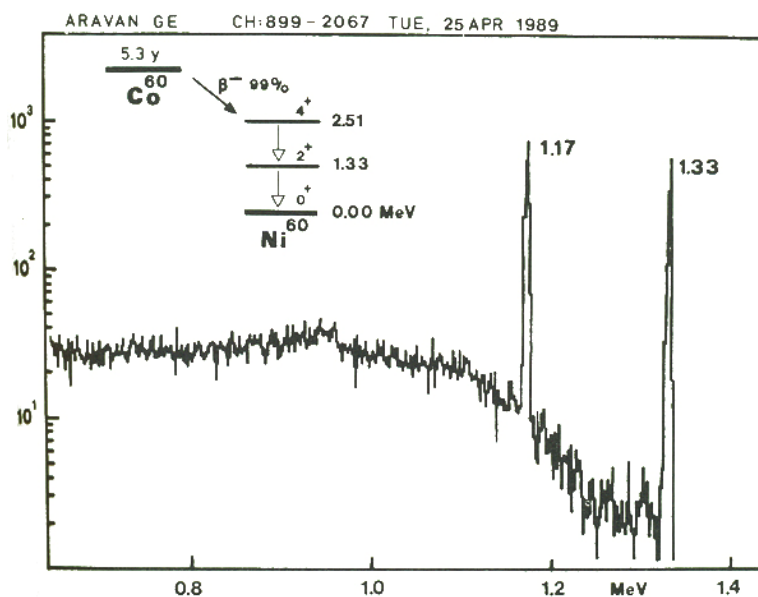
Στην άσκηση γίνεται μελέτη της εξασθένησεως της  $\gamma$  – ακτινοβολίας από συγκεκριμένο απορροφητή. Η μελέτη συνίσταται στον υπολογισμό του μαζικού και γραμμικού συντελεστή εξασθένησεως καθώς και του πάχους υποδιπλασιασμού του απορροφητή.

Οι υπολογισμοί αυτοί επιτυγχάνονται πειραματικά με την βοήθεια ενός απεριθμητή Geiger – Muller δια μέσου των κρούσεων που καταγράφονται στην αντίστοιχη πυρηνική, μετρητική μονάδα. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται στην άσκηση παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 4

Η χρησιμοποιούμενη πηγή της ακτινοβολίας –  $\gamma$  είναι το Co – 60 (πρόκειται για ραδιενεργό πηγή εκπαιδευτικού χαρακτήρα με ενεργότητα 5 $\mu$ Ci) και χρόνο ημιζωής 5.3 χρόνια ( $\tau = 5.3y$ ). Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται αφ' ενός το σχηματικό διάγραμμα παραγωγής των δυο ακτίνων –  $\gamma$  που η συγκεκριμένη πηγή δημιουργεί από την αποδιέγερση του θυγατρικού πυρήνα Ni – 60 και αφ' ετέρου το ενεργειακό φά-



Σχήμα 5

σμα των δυο αυτών ακτίνων που έχουν ενέργειες 1.17 και 1.33 MeV ίσης περίπου έντασης. Οι απορροφητές που διαθέτει το εργαστήριο και χρησιμοποιούνται στην άσκηση είναι σετ ομοιόμορφων φύλλων μολύβδου (Pb) ή και αλουμινίου (Al) .

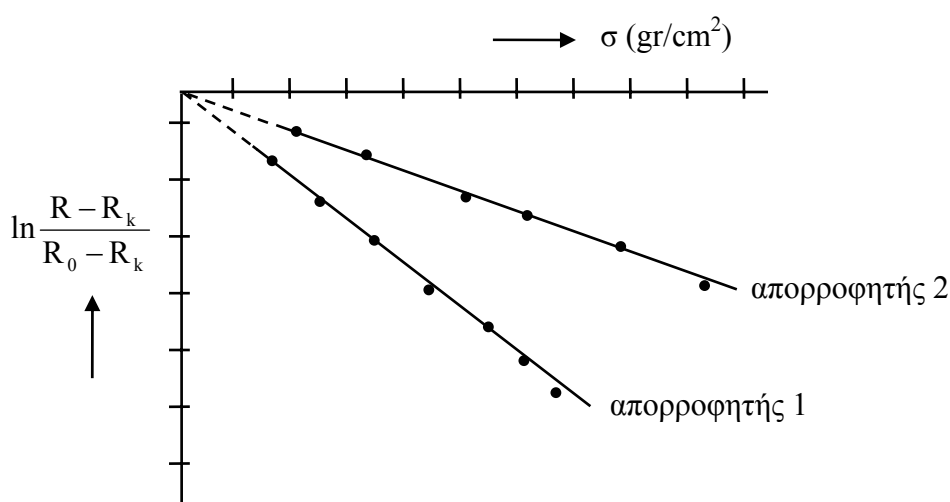
Η επιλογή του απορροφητή είναι ευθύνη του επιβλέποντα καθηγητή που μπορεί, ανάλογα με τις συνθήκες, να ζητήσει την διαδοχική χρησιμοποίηση ΚΑΙ των δυο σετ απορροφητών με σκοπό την τελική σύγκριση των δυο συντελεστών γραμμικής εξασθενήσεως. Στην διάταξη που προαναφέρθηκε θα πρέπει τα φύλλα του απορροφητή να είναι ακριβώς μπροστά από το «παράθυρο» του ανιχνευτή, έτσι ώστε η ακτινοβολία που καταγράφεται σε αυτόν να χρειάζεται να διαπερνά, κάθε φορά, όλο το στρώμα του απορροφητή σε σχεδόν κάθετη διεύθυνση.

Στο διαδικαστικό τώρα μέρος ο πειραματικός προσδιορισμός του μαζικού συντελεστή απορροφήσεως στηρίζεται ουσιαστικά στο γεγονός ότι η ένταση  $J$  της ακτινοβολίας είναι ανάλογη του ρυθμού κρούσεων που αυτή καταγράφει σε ένα μετρητικό κύκλωμα με απαριθμητή G.M. Έτσι, η αναλογία αυτή μετατρέπει την σχέση εντάσεων ακτινοβολίας  $J$  σε σχέση ρυθμού κρούσεων  $R$ . Δηλαδή από την σχέση :

$$\ln (J / J_0) = - \kappa \sigma \text{ καταλήγουμε στην σχέση : } \ln (R / R_0) = - \kappa \sigma$$

όπου  $\kappa$  ο άγνωστος μαζικός συντελεστής και  $\sigma$  η επιφανειακή πυκνότητα του απορροφητή.

Βέβαια θα πρέπει απαραίτητα να ληφθεί υπόψη και το γεγονός ότι οι καταμετρούμενες πειραματικά κάθε φορά κρούσεις  $R$  αφορούν όχι μόνο την ακτινοβολία που προέρχεται από την ραδιενεργό πηγή αλλά αυτή που προέρχεται μόνιμα από το εξωτερικό περιβάλλον (background radiation). Για την αντιμετώπιση της καταστάσεως αυτής υπολογίζουμε αρχικά τον ρυθμό κρούσεων  $R_k$  που ο ανιχνευτής καταγράφει χωρίς την παρουσία της ραδιενεργού πηγής. Στην συνέχεια, γνωρίζοντας ότι με την παρουσία της ραδιενεργού πηγής ο απαριθμητής θα καταμετρά για ρυθμό κρούσεων το αθροιστικό αποτέλεσμα  $R$  και από τις δυο αιτίες (ραδιενεργός πηγή αλλά και ακτινοβολία περιβάλλοντος), αρκεί η αφαίρεση  $R - R_k$  για να υπολογιστεί ο πραγματικός



Σχήμα 6

αριθμός κρούσεων που αντιστοιχούν στη ραδιενεργό πηγή. Έτσι λοιπόν προκύπτει η σχέση :

$$\ln [ (R - R_k) / (R_0 - R_k) ] = - \kappa \sigma$$

Από την τελευταία αυτή σχέση παρατηρείται ότι η γραφική παράσταση

$$\ln [ (R - R_k) / (R_0 - R_k) ] = f(\sigma)$$

θα αντιστοιχεί σε ευθεία με αρνητική κλίση, ακριβώς ίση με  $-k$ . Προσδιορίζεται δηλαδή έτσι πειραματικά ο άγνωστος μαζικός συντελεστής εξασθενήσεως  $k$ .

Η πειραματική αυτή ευθεία χαράσσεται αφού πρώτα μετρήσουμε τους ρυθμούς κρούσεων  $R$  για διαφορετικά πάχη φύλλων απορροφητή που κατάλληλα παρεμβάλλουμε μεταξύ ραδιενεργού πηγής και απαριθμητή Geiger – Muller.

Ο αριθμός των παραγόμενων κρούσεων (για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα αναγράφεται σε ψηφιακή μορφή στην μονάδα καταγραφής).

Είναι σημαντικό, προτού αρχίσει η εκτέλεση της άσκησης να επισημανθούν τα εξής :

1. Μην αγγίζετε για ΚΑΝΕΝΑ λόγο το ειδικό, προστατευτικό κάλυμμα του λεπτού παράθυρου στον απαριθμητή Geiger – Muller. Ο κίνδυνος καταστροφής του απαριθμητή είναι άμεσος.
2. Μην αγγίζεται με γυμνά χέρια την ραδιενεργό πηγή. Η πηγή αυτή, αν και εκπαιδευτικού χαρακτήρα, θα πρέπει να τοποθετείται στην πειραματική διάταξη με ευθύνη του επιβλέποντα καθηγητή και πάντοτε προσεκτικά με την ειδική προς τούτο λαβίδα.
3. Με το τέλος των μετρήσεων η ραδιενεργός πηγή επιστρέφει στο ειδικό, θωρακισμένο δοχείο φύλαξης.

#### 4. Εργασίες

1. Αναγνωρίζουμε και κατανοούμε την πειραματική διάταξη. Θέτουμε εντός λειτουργίας την μετρητική μονάδα. Επιλέγουμε με τον διακόπτη του οργάνου τάση λειτουργίας του ανιχνευτή Geiger – Muller περίπου 400Volts. Μηδενίζουμε την ένδειξη του μετρητή και καταμετρούμε για το χρονικό διάστημα ενός λεπτού (1min) τις παραγόμενες κρούσεις ΧΩΡΙΣ την ραδιενεργό πηγή. Υπολογίζουμε έτσι τον ρυθμό των παραγόμενων κρούσεων ανά δευτερόλεπτο  $R_k$  (κρούσεις / sec) που αφορά την φυσική ραδιενέργεια υποβάθρου στον χώρο του εργαστηρίου (background radiation).

**Προσοχή :** Για την μέτρηση της ακτινοβολίας υποβάθρου θα πρέπει να μην υπάρχει ραδιενεργός πηγή όχι μόνο ακριβώς μπροστά από την μετρητική διάταξη του ανιχνευτή αλλά και σε όλη την ευρύτερη περιοχή κοντά στην πειραματική διάταξη (π.χ. γειτονικές διατάξεις ασκήσεων πυρηνικής).

2. Τοποθετείται από τον επιβλέποντα καθηγητή ραδιενεργός πηγή  $Co - 60$ ,  $\gamma$  – ακτινοβολίας στην ειδική θέση και σε μικρή σχετικά απόσταση μπροστά από το παράθυρο του G.M. Επαναλαμβάνουμε την διαδικασία μέτρησης όπως στην προηγούμενη ερώτηση για ένα επίσης λεπτό. Να προηγείται πάντοτε πριν από κάθε μέτρηση ο μηδενισμός της ένδειξης του μετρητή. Υπολογίζουμε έτσι τον ρυθμό των παραγόμενων κρούσεων  $R_0$  ανά δευτερόλεπτο.
3. Παρεμβάλλουμε μεταξύ της πηγής και του απαριθμητή, επί του ειδικού στηρίγματος, φύλλα συγκεκριμένου απορροφητή από το σετ των απορροφητών

που προτείνει ο υπεύθυνος του εργαστηρίου. Σε κάθε φύλλο αναγράφεται ο αριθμός που το χαρακτηρίζει. Οι απορροφητές να τοποθετούνται με προσοχή ακριβώς μπροστά από το παράθυρο του απαριθμητή. Επαναλαμβάνουμε την διαδικασία μέτρησης της προηγούμενης ερώτησης για ένα λεπτό. Από τις κρούσεις N που κάθε φορά καταμετρούνται υπολογίζεται ο ρυθμός R των κρούσεων ανά δευτερόλεπτο και καταγράφονται τα αποτελέσματα στον πίνακα των μετρήσεων που ακολουθεί :

### Πίνακας μετρήσεων - Υπολογισμών

	$\alpha/\alpha$	$\sigma$ (gr/cm <sup>2</sup> )	N	R	$R - R_k$ κρούσεις/s	$r = (R - R_k)/(R_0 - R_k)$	ln r
Pb	11	3.58					
	12	7.15					
	13	10.73					
	14	14.30					
	14+11	17.88					
	14+12	21.45					
Al	1	1.31					
	2	2.61					
	2+3	5.22					
	2+3+4	7.83					
	2+3+4+5	10.44					

4. Να γίνει η γραφική παράσταση  $\ln [ (R - R_k) / (R_0 - R_k) ] = f(\sigma)$  σε χιλιοστομετρικό χαρτί και να χαραχθεί προσεκτικά η πειραματική ευθεία που βέβαια αντιστοιχεί στον συγκεκριμένο απορροφητή. Η ευθεία αυτή στην προέκτασή της θα πρέπει να «διέρχεται» από την αρχή των αξόνων.

5. Από την κλίση της προηγούμενης πειραματικής ευθείας, για κάθε απορροφητή, υπολογίζεται ο μαζικός συντελεστής εξασθένησεως  $\kappa$  (σε cm<sup>2</sup> / gr)

$$\kappa = \quad (\text{σε cm}^2 / \text{gr})$$

6. Από τον μαζικό συντελεστή εξασθένησεως  $\kappa$  που μόλις υπολογίστηκε προηγουμένως και την πυκνότητα του απορροφητή (μόλυβδος 11.35 και αντίστοιχα αλουμίνιο 2.70 gr / cm<sup>3</sup>) υπολογίζεται ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησεως  $\mu$  σε cm<sup>-1</sup>.

$$\mu = \quad (\text{σε cm}^{-1})$$

7. Συγκρίνουμε την πειραματική τιμή της προηγούμενης ερώτησης με αυτή που προκύπτει από την βιβλιογραφία αξιοποιώντας την γραφική παράσταση  $\mu = f(E_\gamma)$  που υπάρχει στην άσκηση. Να υπολογιστεί η επί τοις % διαφορά και να δικαιολογηθεί η ύπαρξή της. Πόσο ενοχλεί το γεγονός ότι η πηγή των ακτίνων  $\gamma$  που χρησιμοποιήθηκε δεν είναι μονοενεργειακή ; Πρόκειται δηλαδή για πη-

γή που εκπέμπει δυο ίσης έντασης ακτίνες – γ με ενέργειες αντίστοιχα 1.17 και 1.33 MeV.

8. Από τον γραμμικό συντελεστή εξασθένησεως να βρεθεί το πάχος υποδιπλασιασμού του απορροφητή (ή των απορροφητών) που χρησιμοποιήθηκαν.

$$I_{1/2} = \quad (\text{σε cm})$$

9. Με δεδομένες πια τις πειραματικές τιμές που βρήκατε ποιους απορροφητές θα χρησιμοποιούσατε πρακτικά για να θωρακίσετε όσο γίνεται καλύτερα την ραδιενεργό πηγή Co – 60 που χρησιμοποιήσατε ;

### ΘΕΜΑΤΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ ΚΑΤΑΝΟΗΣΗΣ

1. Που νομίζετε ότι μπορεί να οφείλονται οι κρούσεις που ο ανιχνευτής της άσκησης καταγράφει παρά την απουσία της ραδιενεργού πηγής ; (Ραδιενέργεια περιβάλλοντος, Background radiation).
2. Γιατί πιστεύετε ότι για το φαινόμενο της δίδυμης γένεσης χρειάζεται η ακτινοβολία γ να διαθέτει σχετικά μεγάλη ενέργεια και πάντως μεγαλύτερη από 1.02 MeV ; (ενεργειακό κατώφλι).
3. Η πειραματική ευθεία  $\ln [ (R - R_k) / (R_0 - R_k) ] = f(\sigma)$  θα πρέπει (η προέκτασή της) να διέρχεται από την αρχή των αξόνων (ερώτηση 4 της άσκησης). Να δικαιολογηθεί αναλυτικά γιατί συμβαίνει αυτό το γεγονός ;
4. Κάποιοι ισχυρίζονται ότι ο σωστότερος όρος είναι : «εξασθένηση γ ακτινοβολίας» αντί για «απορρόφηση γ ακτινοβολίας», γιατί νομίζετε ότι έχουν δίκιο ; Ποια η διαφορά των δυο διατυπώσεων ;
5. Περιγράψτε περιληπτικά τις όποιες διαφορές γνωρίζετε μεταξύ της ακτινοβολίας γ και των ακτίνων X.
6. «Η ραδιενέργεια οποιασδήποτε ραδιενεργού πηγής ελαττώνεται στο 1/1000 της αρχικής μετά από 10 χρόνους ημιζωής». Να αποδειχθεί αναλυτικά η ορθότητα της προηγούμενης πρότασης. Αξιοποιώντας τον προηγούμενο ισχυρισμό να προβλέψετε τις κρούσεις  $R_0$  ανά δευτερόλεπτο που θα καταγραφούν από την ίδια ακριβώς πηγή Co – 60 της άσκησης μετά από 53 έτη.
7. Τι ακριβώς ονομάζεται «μέση εμβέλεια» φωτονίων σε συγκεκριμένο απορροφητή ; και σε τι διαφέρει η εμβέλεια αυτή με το πάχος υποδιπλασιασμού του απορροφητή ;

ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΕΣ ΓΝΩΣΕΙΣ : Σύσταση, ιδιότητες πυρήνα, Φυσική ραδιενέργεια, Νόμος ραδιενεργών μετατροπών, Απαριθμητή Geiger – Muller.