



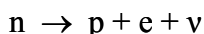
Μελέτη των χαρακτηριστικών της β - ραδιενεργού εκπομπής

1. Σκοπός

Η εργαστηριακή αυτή άσκηση μελετά τα χαρακτηριστικά της β⁻ ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα υπολογίζεται πειραματικά η εμβέλεια των σωματίων β⁻ (ηλεκτρονίων) που προέρχονται από την ραδιενεργή πηγή Sr – 90 με την βοήθεια λεπτών, φύλλων απορροφητή αλουμινίου διαφορετικού πάχους. Στην συνέχεια προσδιορίζεται η μέγιστη τιμή της κινητικής ενέργειας των σωματίων β⁻ και συγκρίνεται με αυτή της βιβλιογραφίας. Τέλος, υπολογίζεται ο μαζικός συντελεστής εξασθενήσεως των ακτίνων β⁻ για τον συγκεκριμένο απορροφητή.

2. Θεωρία

Όπως γνωρίζουμε οι ακτίνες β⁻ είναι ηλεκτρόνια (β σωματία) που εκπέμπονται διαμέσου κάποιας πυρηνικής μεταστοιχείωσης. Πιο συγκεκριμένα τα ηλεκτρόνια, αν και δεν αποτελούν συστατικό του πυρήνα, δημιουργούνται κατά την μετατροπή ενός αφορτιστού νετρονίου (n) του πυρήνα σε ένα πρωτόνιο (p) σύμφωνα με την αντίδραση



όπου το ν είναι ένα ακόμη προϊόν της μετατροπής και λέγεται αντινεutrino. Οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης που προκαλούν την παραπάνω μετατροπή καλούνται δυνάμεις ασθενούς αλληλεπίδρασης.

Το ενεργειακό φάσμα των σωματίων β⁻ είναι συνεχές με χαρακτηριστική τιμή την μέγιστη ενέργεια E_{max} που αποτελεί κύρια παράμετρο της β⁻ διάσπασης και καθορίζεται σχεδόν μονοσήμαντα από την ταυτότητα της συγκεκριμένης ραδιενεργού πηγής.

Τα σωματία β⁻ λόγω της πολύ μικρής τους μάζας κατά την διαδρομή τους στην ύλη διαγράφουν πολύ ακανόνιστες τροχιές. Έτσι θα πρέπει να γίνεται διαχωρισμός ανάμεσα στο ολικό μήκος της διαδρομής που διαγράφει το σωματίο μέχρι να απορροφηθεί πλήρως και της εμβέλειας που δεν άλλη από την απόσταση που διανύει αυτό το σωματίο στο υλικό μέχρι να απορροφηθεί, εφόσον όμως η απόσταση αυτή μετρηθεί παράλληλα με την αρχική διεύθυνση της δέσμης. Έχει πειραματικά αποδειχθεί ότι το ολικό μήκος της διαδρομής αυξάνει με τον ατομικό αριθμό Z του απορροφητή και πάντως είναι από 1.2 έως 4 φορές μεγαλύτερο από την αντίστοιχη τιμή εμβέλειας. Η απορρόφηση των σωματίων β⁻ από την ύλη ακολουθεί τον γνωστό εκθετικό νόμο και οφείλεται στους εξής δυο κυρίως μηχανισμούς αλληλεπίδρασης :

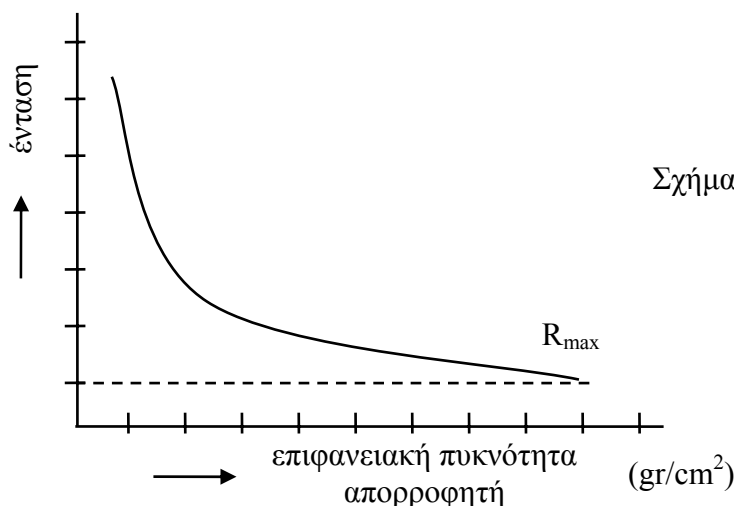
1. Διέγερση και ιονισμός των ατόμων του απορροφητή διαμέσου συγκρούσεων με τροχιακά ηλεκτρόνια. Αυτή η αλληλεπίδραση κυριαρχεί, για απορροφητές

μεγάλου Z , στις σχετικά μικρές κινητικές ενέργειες των β^- σωματίων (από 0.005 έως 0.5 MeV) και

2. Στον μηχανισμό της ακτινοβολίας πεδήσεως που οφείλεται στην εκπεμπόμενη ακτινοβολία από κάθε επιταχυνόμενο φορτισμένο σωματίο. Για απορροφητές επίσης μεγάλου Z ο μηχανισμός αυτός αρχίζει να κάνει ουσιαστική την εμφάνισή του κυρίως σε περιοχές ενεργειών μεγαλύτερες από 1.0 MeV.

Βέβαια οι τυχόν ελαστικές σκεδάσεις των σωματίων β^- με τους πυρήνες του απορροφητή δεν αντιστοιχούν σε μηχανισμό απορρόφησης στο μέτρο που η κινητική ενέργεια των σωματίων παραμένει αμετάβλητη, ενώ το μόνο που αλλάζει είναι η διεύθυνση της τροχιάς των.

Η καμπύλη απορρόφησης των σωματίων β^- με συνεχές ενεργειακό φάσμα είναι σε πολύ καλή προσέγγιση εκθετική. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται μια τέτοια πειραματική καμπύλη, όπου για μεγάλο πάχος απορροφητή εμφανίζει μια σταθερή τιμή (τιμή υποβάθρου) που οφείλεται στη συνεισφορά της γ - ακτινοβολίας, ακτινοβολία πεδήσεως κ.α.

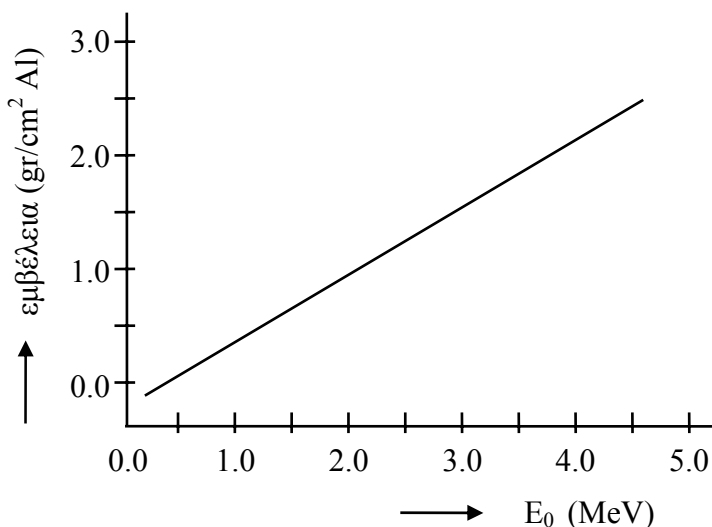


Το σημείο όπου η καμπύλη απορρόφησης «τέμνει» αυτή του υποβάθρου αντιστοιχεί στην μέγιστη εμβέλεια R_{\max} για τα σωματία β^- . Υπενθυμίζεται ότι η R_{\max} δεν είναι εύκολο να υπολογιστεί άμεσα πειραματικά, εφόσον αντιστοιχεί σε περίπτωση όπου ο αριθμός των σωματίων β^- που την ικανοποιεί είναι σχεδόν μηδενικός. Υπάρχουν όμως αρκετές εμπειρικές σχέσεις που υπολογίζουν την εμβέλεια R_{\max} , των σωματίων β^- σε σχέση με την μέγιστη ενέργεια τους.

Οι σχέσεις αυτές λέγονται σχέσεις : Ενέργειας – Εμβέλειας και η συνολική παρουσίασή τους παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί. Στο εμπειρικό αυτό συγκεκριμένο διάγραμμα η μεταβολή της μέγιστης ενέργειας των σωματίων β^- είναι από 0.2 έως περίπου 5 MeV, ενώ η αντίστοιχη μεταβολή για την εμβέλεια είναι (σε μονάδες επιφανειακής πυκνότητας) από 0 έως 2.8 gr/cm^2 .

Σημειώνεται ότι η παρουσίαση της εμβέλειας γίνεται όχι σε ισοδύναμες μονάδες μήκους αλλά σε μονάδες επιφανειακής πυκνότητας σ , μάλιστα αποδεικνύεται ότι ισχύει : $\sigma = \rho l$ όπου ρ η πυκνότητα του απορροφητή και l η αντίστοιχη γραμμική διάσταση του πάχους του απορροφητή.

Έτσι η μέγιστη εμβέλεια είναι ίση με την επιφανειακή πυκνότητα των στρωμάτων



Σχήμα 2

του απορροφητή που απορροφά πλήρως και τα πλέον κινητικά σωματία β^- . Για παράδειγμα από την προηγούμενη γραφική παράσταση φαίνεται ότι για μέγιστη εμβέλεια 1.0 gr/cm^2 η μέγιστη ενέργεια που αντιστοιχεί είναι περίπου 2.1 MeV . Προφανώς, εάν κανείς θέλει να υπολογίσει την εμβέλεια σε μονάδες μήκους, αρκεί απλά η διαίρεση της επιφανειακής πυκνότητας με την πυκνότητα ρ του υλικού του συγκεκριμένου απορροφητή.

Η μέγιστη εμβέλεια των σωματίων β^- , όταν εκφραστεί σε μονάδες επιφανειακής πυκνότητας, είναι σχεδόν ανεξάρτητη από τον απορροφητή και αυτό συμβαίνει διότι σχεδόν όλα τα υλικά των απορροφητών έχουν ηλίκιο Z/A (ατομικός προς μαζικό αριθμό) περίπου σταθερό.

Η εκθετική μορφή της καμπύλης απορρόφησης των σωματίων β^- περιγράφεται πολύ ικανοποιητικά από την σχέση :

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

Όπου J_0 η ένταση της αρχικής, προσπίπτουσας δέσμης, J η ένταση που αντιστοιχεί σε βάθος x ενώ μ ο κατάλληλος συντελεστής εξασθένησης.

Εάν ρ είναι η πυκνότητα του υλικού του απορροφητή, βρέθηκε πειραματικά ότι ο μαζικός συντελεστής κ ($= \mu / \rho$) είναι σχεδόν ανεξάρτητος από τον ατομικό αριθμό Z του απορροφητή. Η εμπειρική σχέση που υπολογίζει προσεγγιστικά τον άγνωστο μαζικό συντελεστή εξασθένησης μ / ρ (σε cm^2 / gr) σε σχέση με την γνωστή μέγιστη ενέργεια E_{max} (σε MeV) των σωματίων β^- είναι :

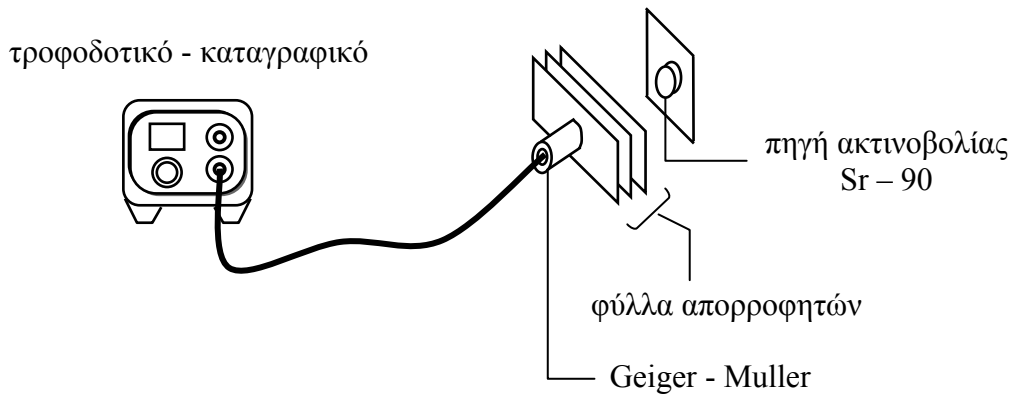
$$K = \mu / \rho = 17 / E_{\text{max}}^{1.14} \text{ για ενέργειες από } 0.1 \text{ έως και } 4 \text{ MeV.}$$

3. Πειραματική διαδικασία

Στην άσκηση αυτή γίνεται μελέτη της εκπομπής β^- ακτινοβολίας από συγκεκριμένη, γνωστή ραδιενεργή πηγή $\text{Sr} - 90$. Η μελέτη συνίσταται στον υπολογισμό της μέγιστης εμβέλειας, μέγιστης κινητικής ενέργειας των σωματίων β^- για την συγκεκριμένη πηγή

καθώς και τον προσδιορισμό του μαζικού συντελεστή εξασθενήσεως για τον χρησιμοποιούμενο απορροφητή Al.

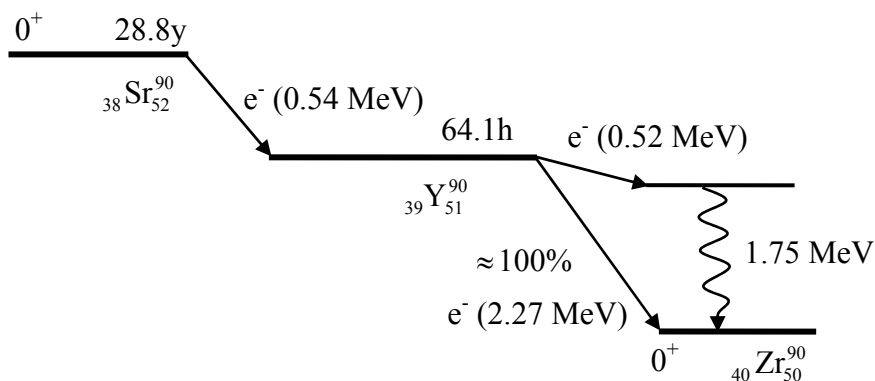
Ο υπολογισμός της μέγιστης εμβέλειας επιτυγχάνεται πειραματικά με την βοήθεια ενός απεριθμητή Geiger – Muller (G. M.) μέσω των κρούσεων που καταγράφονται στην αντίστοιχη ομάδα. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται παρουσιάζεται σχηματικά στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 3

Η χρησιμοποιούμενη πηγή β – ακτινοβολίας είναι το Sr – 90 (9 μ Ci) με αντίστοιχο χρόνο ημιζωής 28.8 έτη. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται το διάγραμμα της διαδοχικής εκπομπής σωματίων β από τους θυγατρικούς πυρήνες Y – 90 (αλλά και Zr – 90). Σημειώνεται ότι οι μέγιστες τιμές ενέργειας των σωματίων β⁻ που εκπέμπονται διαδοχικά είναι : 0.54 και 2.27 MeV αντίστοιχα.

Οι απορροφητές που χρησιμοποιούνται στην εργαστηριακή αυτή άσκηση είναι πολύ λεπτά, ομοιόμορφα φύλλα αλουμινίου και τοποθετούνται κατακόρυφα, ακριβώς



Σχήμα 4

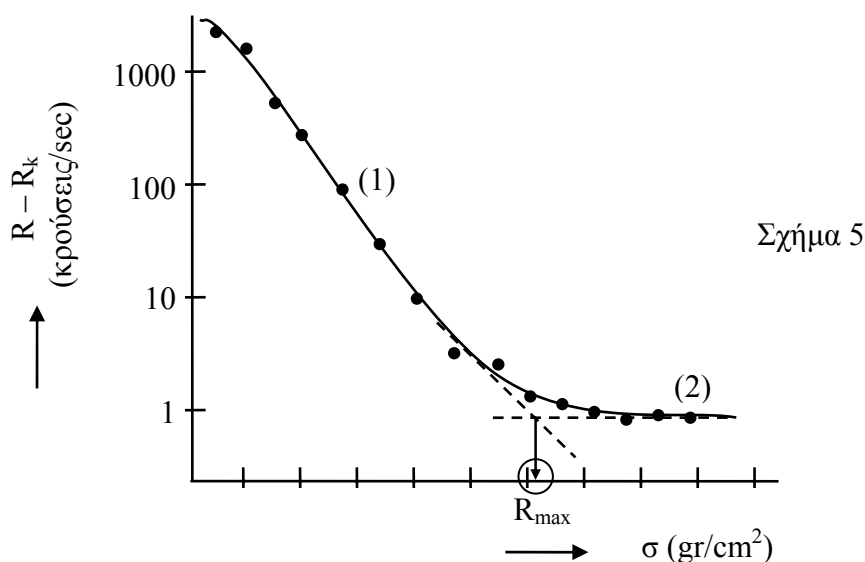
μπροστά από το παράθυρο του ανιχνευτή, έτσι ώστε τα σωματλια β⁻ που κάθε φορά καταγράφονται να διέρχονται αναγκαστικά από υλικό δεδομένου πάχους του απορροφητή.

Στο διαδικαστικό τώρα μέρος, ο πειραματικός προσδιορισμός της εμβέλειας γίνεται διαμέσου της καμπύλης απορροφήσεως που δημιουργείται με την βοήθεια του απεριθμητή G.M. μετρώντας τον ρυθμό κρούσεων (κρούσεις ανά sec) για διάφορα πάχη φύλλων Al που παρεμβάλλονται μεταξύ ραδιενεργού πηγής και απεριθμητή.

Βέβαια θα πρέπει απαραίτητα να ληφθεί υπ' όψη και το γεγονός ότι οι καταμετρούμενες κάθε φορά κρούσεις αφορούν όχι μόνο την ακτινοβολία που προέρχεται από την ραδιενεργό πηγή αλλά και αυτή που προέρχεται, σε μόνιμη βάση, από το εξωτερικό περιβάλλον (background radiation). Για την αντιμετώπιση της καταστάσεως υπολογίζουμε αρχικά τον ρυθμό κρούσεως που ο ανιχνευτής καταγράφει παρά την απουσία της ραδιενεργού πηγής. Τον ρυθμό αυτό των κρούσεων του υπόβαθρου θα πρέπει κάθε φορά να τον αφαιρούμε από τον συνολικά καταγραφόμενο.

Όσο αυξάνουμε το πάχος του παρεμβαλλόμενου στρώματος φύλλων Al τόσο μειώνεται και ο ρυθμός των καταμετρούμενων κρούσεων έως κάποιας ορισμένης τιμής επιφανειακής πυκνότητας πέραν της οποίας όσο και να αυξήσουμε το πάχος του στρώματος των φύλλων παραμένει πρακτικά σταθερός ο ρυθμός των κρούσεων. Αυτό οφείλεται κυρίως στην ακτινοβολία πεδήσεως και την ιδιαίτερα διεισδυτική ακτινοβολία – γ του θυγατρικού πυρήνα που συνοδεύει την β⁻ εκπομπή. Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι ο συγκεκριμένος πυρηνικός ανιχνευτής ανιχνεύει και καταγράφει εκτός των σωματιών β και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία γ.

Στο διάγραμμα του σχήματος που ακολουθεί παρουσιάζεται σε ημι λογαριθμικό χαρτί 4 κύκλων η πειραματική καμπύλη $(R - R_k) = f(\sigma)$.



Για τον γραφικό προσδιορισμό της μέγιστης εμβέλειας R_{max} (σε gr / cm^2) απαιτείται η τομή της προέκτασης του σχεδόν οριζόντιου τμήματος (2) της καμπύλης με την προέκταση του «γραμμικού» τμήματος (1) της καμπύλης στην περιοχή της απότομης πτώσης. Η τομή αυτή αντιστοιχεί σε μια τιμή επιφανειακής πυκνότητας που είναι η ζητούμενη εμβέλεια R_{max} για την συγκεκριμένη β – ραδιενεργό πηγή. Ο αριθμός των παραγομένων κρούσεων (για δεδομένο χρονικό διάστημα) αναγράφεται σε ψηφιακή μορφή στην πυρηνική μονάδα καταγραφής.

Προσοχή : Μην αγγίζεται για κανένα λόγο το ειδικό προστατευτικό κάλυμμα του λεπτού παράθυρου στον απαριθμητή Geiger – Muller. Ο κίνδυνος καταστροφής του απαριθμητή είναι άμεσος.

4. Εργασίες

1. Αναγνωρίζουμε και κατανοούμε την πειραματική διάταξη της άσκησης. Θέτουμε εντός λειτουργίας την μετρητική μονάδα. Επιλέγουμε με τον διακόπτη του οργάνου τάση λειτουργίας του ανιχνευτή Geiger – Muller περίπου 400 Volts. Μηδενίζουμε την ένδειξη του μετρητή και καταμετρούμε για ένα λεπτό (1min) τις κρούσεις χωρίς την ραδιενεργό πηγή. Υπολογίζουμε έτσι τον ρυθμό των παραγόμενων κρούσεων του υποβάθρου ανά δευτερόλεπτο (background radiation) R_k .

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

2. Τοποθετείται από τον υπεύθυνο καθηγητή η β - ραδιενεργός πηγή Sr – 90 στην ειδική θέση και σε σχετικά μικρή απόσταση μπροστά από τον ανιχνευτή. Παρεμβάλλουμε μεταξύ πηγής και του παράθυρου του ανιχνευτή λεπτά φύλλα απορροφητή Al. Σε κάθε φύλλο αναγράφεται ο αριθμός που το χαρακτηρίζει. Οι απορροφητές θα πρέπει να τοποθετούνται κατακόρυφα και με προσοχή ακριβώς μπροστά από το άνοιγμα του ανιχνευτή. Επαναλαμβάνουμε την διαδικασία μέτρησης όπως και στην προηγούμενη ερώτηση για ένα λεπτό.

Προσοχή, Να προηγείται πάντα και πριν από κάθε μέτρηση ο μηδενισμός (reset) της ένδειξης του μετρητή. Από τις κρούσεις N που κάθε φορά καταμετρούνται υπολογίζεται ο ρυθμός (κρούσεις / sec) και καταγράφονται τα αποτελέσματα στον συγκεντρωτικό πίνακα των πειραματικών μετρήσεων που ακολουθεί.

Πίνακας Μετρήσεων – Υπολογισμών

a/a	$\sigma + \sigma_0$ (gr / cm ²)	N (κρούσεις)	R (κρούσεις / sec)	R – R _k (κρούσεις / sec)
5	0.16			
6	0.29			
7	0.45			
8	0.56			
9	0.70			
10	0.87			
10+4+3	1.04			
8+9	1.25			
9+10	1.56			
7+8+9	1.69			
8+9+10	2.11			

Στον επάνω πίνακα μετρήσεων, η δεύτερη στήλη $\sigma + \sigma_0$ περιέχει τις «διορθωμένες» τιμές της επιφανειακής πυκνότητας λόγω της απαραίτητης παρουσίας του παράθυρου του Geiger – Muller (με επιφανειακή πυκνότητα σ_0).

3. Να γίνει η γραφική παράσταση : $(R - R_k) = f(\sigma + \sigma_0)$ σε ημιλογαριθμικό χαρτί 4 κύκλων και να χαραχθεί η πειραματική καμπύλη. Η καμπύλη αυτή θα πρέπει για τις μεγάλες τιμές της επιφανειακής πυκνότητας να γίνεται σχεδόν παράλληλη προς τον οριζόντιο άξονα.
4. Να υπολογιστεί γραφικά, η μέγιστη εμβέλεια R_{\max} (σε gr / cm^2) από την τομή των προεκτάσεων συγκεκριμένων τμημάτων της πειραματικής καμπύλης όπως περιγράφηκε αναλυτικά σε προηγούμενο σχήμα. Εάν η πυκνότητα του απορροφητή του Al είναι $2.70 \text{ gr} / \text{cm}^3$ πόση είναι η μέγιστη εμβέλεια σε μονάδες μήκους ;
5. Αξιοποιώντας την γραφική παράσταση $R_{\max} = f(E_{\max})$ που βρίσκεται στο θεωρητικό μέρος της άσκησης και γνωρίζοντας την μέγιστη εμβέλεια η οποία υπολογίστηκε πειραματικά, να προσδιοριστεί η μέγιστη τιμή E_{\max} (σε MeV) των β^- σωματιών για το Sr – 90.
6. Στην βιβλιογραφία η ενέργεια των σωματιών β^- που προέρχονται από ραδιενεργούς πυρήνες Sr – 90 φαίνεται να είναι 2.27 MeV. Συγκρίνουμε την βιβλιογραφική αυτή τιμή με την πειραματική της προηγούμενης ερώτησης, ποια η επί τοις % διαφορά ; που μπορεί να οφείλεται ;
7. Από την αναλυτική σχέση $\kappa = \mu / \rho = 17 / E^{1.14}_{\max}$ να υπολογιστεί ο μαζικός συντελεστής κ (σε cm^2 / gr) των ακτίνων β^- για το Al.
8. Ποιο είναι το πάχος υποδιπλασιασμού για τον απορροφητή του Al που θα περιόριζε στο μισό την ένταση της συγκεκριμένης ραδιενεργού πηγής που χρησιμοποιήθηκε στην άσκηση ;

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. Μπορείτε να προτείνετε ένα πρόχειρο, πειραματικό τρόπο διαχωρισμού των ακτινοβολιών β^- και γ που (έστω) ότι συνυπάρχουν σε μια μικτού χαρακτήρα ραδιενεργή πηγή.
3. «Η ραδιενέργεια οποιασδήποτε ραδιενεργού πηγής ελαττώνεται στο 1/1000 της αρχικής μετά από 10 χρόνους ημιζωής». Να αποδειχθεί αναλυτικά η ορθότητα της προηγούμενης πρότασης.

ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΕΣ ΓΝΩΣΕΙΣ : Σύσταση, Ιδιότητες πυρήνα, Φυσική ραδιενέργεια, Νόμος ραδιενεργών μετατροπών, Απαριθμητής Geiger – Muller.

