

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 21 <sup>(1)</sup>

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΤΩΝ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ Β

### 21.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

Σκοπός της εργαστηριακής αυτής άσκηση είναι η πειραματική μελέτη του φαινομένου της απορρόφησης των σωματιδίων β τα οποία εκπέμπονται από ραδιενεργό πηγή Sr-90.

Στα πλαίσια της εργαστηριακής αυτής άσκησης:

- 1 Θα επαληθευτεί πειραματικά ο νόμος της απορρόφησης των σωματιδίων β από την ύλη.
- 2 Θα προσδιοριστούν:
  - Η μέση και η μέγιστη εμβέλεια των σωματιδίων β μέσα στο αλουμίνιο.
  - Η μέγιστη ενέργεια των σωματιδίων β που εκπέμπονται από τη πηγή Sr-90.
  - Ο μαζικός και ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης των σωματιδίων β στο αλουμίνιο, από γραφική παράσταση και θα συγκριθούν με την εμπειρική σχέση του Feather.

### \*21.2 ΘΕΩΡΙΑ

Το 1896 ο *Bequerel* ανακάλυψε ότι τα ορυκτά του ουρανίου εκπέμπουν ακτινοβολία χωρίς καμιά εξωτερική αιτία. Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται ραδιενεργός και γίνεται αντιληπτή από το γεγονός ότι προκαλεί αμαύρωση σε φωτογραφικές πλάκες. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και σε άλλα στοιχεία, τα οποία βρίσκονται προς το τέλος του Περιοδικού Πίνακα και τα οποία ονομάζονται ραδιενεργά στοιχεία.

Μεταγενέστερες πειραματικές μελέτες έδειξαν ότι η ραδιενέργεια συνίσταται από τρία διαφορετικά είδη ακτινοβολιών οι οποίες συμβολίζονται με τα γράμματα α, β και γ του ελληνικού αλφάβητου. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι η ακτινοβολία γ είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ενώ η «ακτινοβολία» α αποτελείται από πυρήνες He, και η ακτινοβολία β αποτελείται από ηλεκτρόνια (και σε ορισμένες περιπτώσεις ποζιτρόνια). Η διαπίστωση αυτή γίνεται εύκολα αν τοποθετήσουμε την ραδιενεργό πηγή μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Πράγματι στη περίπτωση αυτή θα παρατηρήσουμε ότι τα σωματίδια α και τα σωματίδια β εκτρέπονται σε διευθύνσεις που είναι αντίθετες μεταξύ τους, ενώ η ακτινοβολία γ δεν υφίσταται καμιά εκτροπή. Πρέπει να σημειώσουμε εδώ ότι κατά την εκπομπή της ραδιενέργειας, το ραδιενεργό στοιχείο διασπάται και μεταστοικειώνεται σε άλλο στοιχείο, το οποίο λέγεται και θυγατρικό σε αντίθεση με το αρχικό στοιχείο το οποίο λέγεται μητρικό, εκπέμποντας ταυτόχρονα σωματίδια

<sup>1</sup> Η άσκηση αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία διότι φέρνει σε επαφή το σπουδαστή με το ευαίσθητο θέμα της ραδιενέργειας. Έτσι, το θεωρητικό μέρος που ακολουθεί είναι εκτενές, προκειμένου να συμπεριληφθούν οι βασικοί ορισμοί αλλά και αρκετή εγκυκλοπαιδική πληροφορία γενικότερα στο θέμα των ιοντιζουσών ακτινοβολιών. Για τις ανάγκες ωστόσο του πειραματικού μέρους της άσκησης και της συγγραφής της εργασίας, σημειώνονται με αστερίσκο (\*) οι σχετικές παράγραφοι.

α και ακτινοβολία γ, ή σωματίδια β και ακτινοβολία γ. Σε καμιά περίπτωση δεν έχει διαπιστωθεί ταυτόχρονη εκπομπή σωματιδίων α και β και ακτινοβολίας γ.

Στην α-διάσπαση ο μαζικός αριθμός του θυγατρικού πυρήνα είναι κατά τέσσερεις μονάδες μικρότερος από το μαζικό αριθμό του μητρικού πυρήνα ενώ ο ατομικός αριθμός είναι κατά δυο μονάδες μικρότερος. Στη β-διάσπαση ο ατομικός αριθμός του θυγατρικού πυρήνα είναι κατά μια μονάδα μικρότερος ενώ ο μαζικός αριθμός παραμένει αμετάβλητος. Αντίθετα, στη γ ακτινοβολία ο ατομικός και ο μαζικός αριθμός του ραδιενεργού στοιχείου παραμένουν αμετάβλητοι.

### 21.2.1 Απαραίτητες Γνώσεις.

1. Δομή του Πυρήνα του Ατόμου.
2. Τα Νουκλεόνια Πρωτόνιο και Νετρόνιο.
3. Ισότοπα στοιχεία,
4. Φυσική και Τεχνική Ραδιενέργεια.
5. Η Φύση των σωματιδίων α και β και της Ακτινοβολίας γ.
6. Μέθοδοι Μέτρησης της Ραδιενέργειας.
7. Τα Στοιχειώδη Σωματίδια Νετρίνο και Αντινετρίνο.
8. Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες.
9. Γραφικές Παραστάσεις.

### \*21.2.2 Ο Νόμος των Ραδιενεργών Μετατροπών.

Θεωρούμε ένα ραδιενεργό υλικό το οποίο αποτελείται από ένα πολύ μεγάλο αριθμό πυρήνων από το ίδιο ισότοπο και επί πλέον θεωρούμε ότι όλοι αυτοί οι πυρήνες μεταστοιχειώνονται με α-διάσπαση ή με β-διάσπαση. Στη περίπτωση αυτή έχει βρεθεί ότι ένας πυρήνας δεν διασπάται αμέσως μόλις δημιουργηθεί αλλά υπάρχει μια πεπερασμένη πιθανότητα να διασπασθεί σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Με βάση αυτή τη παρατήρηση, υποθέτουμε ότι τη χρονική στιγμή  $t$  το θεωρούμενο ραδιενεργό υλικό έχει  $N$  αδιάσπαστους πυρήνες. Ο αριθμός  $dN$  των πυρήνων που θα διασπασθούν στο χρονικό διάστημα  $(t, t+dt)$  είναι ανάλογος του αρχικού αριθμού πυρήνων και ανάλογος του χρονικού διαστήματος  $dt$ . Συγκεκριμένα:

$$dN = -\lambda \cdot N \cdot dt \quad (21.1)$$

όπου  $\lambda$  είναι η σταθερά διάσπασης που χαρακτηρίζει το συγκεκριμένο ραδιενεργό ισότοπο. Το αρνητικό πρόσημο προκύπτει από το γεγονός ότι με τη πάροδο του χρόνου ο αριθμός των ραδιενεργών πυρήνων ελαττώνεται και ως εκτούτου το  $dN$  θα είναι πάντοτε αρνητικός αριθμός. Με ολοκλήρωση της ΣΧΕΣΗΣ (21. 1) προκύπτει η σχέση:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (21.2)$$

Όπου  $N_0$  είναι ο αριθμός των αδιάσπαστων πυρήνων τη χρονική στιγμή  $t=0$ . Η ΣΧΕΣΗ (21.2) αποτελεί τη μαθηματική έκφραση του **Νόμου των ραδιενεργών μετατροπών** ο οποίος δηλώνει ότι ο αριθμός των αδιάσπαστων πυρήνων μειώνεται εκθετικά με το χρόνο.

### \*21.2.3 Παράμετροι των Ραδιενεργών Υλικών.

Κάθε ραδιενεργό υλικό χαρακτηρίζεται από τρεις βασικές παραμέτρους οι οποίες προκύπτουν από το νόμο των ραδιενεργών μετατροπών. Οι παράμετροι αυτοί είναι η **ενεργότητα (activity)**, ο **χρόνος υποδιπλασιασμού (half time)** και ο **μέσος χρόνος ζωής (lifetime)**.

Η **ενεργότητα** του ραδιενεργού υλικού ισούται με τον ρυθμό των πυρηνικών διασπάσεων, δηλαδή είναι ίσος με το πηλίκο  $dN/dt$  και προκύπτει από τις ΣΧΕΣΕΙΣ (21.1) και (21.2). Συγκεκριμένα:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \Rightarrow$$

$$\boxed{\frac{dN}{dt} = -\lambda N_0 e^{-\lambda t}} \quad (21.3)$$

Η ενεργότητα μιας ραδιενεργού πηγής μετρείται σε *Curie* (ή *Ci*) όπου το 1 *Ci* ισοδυναμεί με  $3.7 \times 10^{10}$  διασπάσεις ανά δευτερόλεπτο. Από τη ΣΧΕΣΗ (21.3) προκύπτει ότι η ενεργότητα μιας ραδιενεργού πηγής μειώνεται εκθετικά με το χρόνο.

Ο **χρόνος υποδιπλασιασμού**  $t_{1/2}$  ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται ώστε να διασπαστεί ο μισός αριθμός των αρχικών πυρήνων. Αυτό σημαίνει ότι σε χρόνο  $t=t_{1/2}$  ο αριθμός  $N$  των αδιάσπαστων πυρήνων θα είναι ίσος με  $N=N_0/2$ . Οπότε, από τη ΣΧΕΣΗ (21.2) θα έχουμε:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \Rightarrow$$

$$\boxed{t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}} \quad (21.4)$$

Ο **μέσος χρόνος ζωής**  $\tau$  μιας ραδιενεργού πηγής εκφράζει τη μέση διάρκεια ζωής ενός πυρήνα και ισούται με το χρόνο που απαιτείται για να μειωθεί ο αρχικός αριθμός πυρήνων από τη τιμή  $N_0$  στη τιμή  $N_0/e$ . Οπότε από τη ΣΧΕΣΗ (21.2) θα έχουμε:

$$\frac{N_0}{e} = N_0 e^{-\lambda \tau} \Rightarrow$$

$$\boxed{\tau = \frac{1}{\lambda}} \quad (21.5)$$

Στη φύση έχουν βρεθεί περίπου 330 ραδιενεργά ισότοπα. Από αυτά, τα 25 δημιουργήθηκαν με το σχηματισμό της Γης (πριν από  $3.5 \times 10^9$  χρόνια) και υπάρχουν μέχρι σήμερα. Επίσης, 35 βαριά ραδιενεργά ισότοπα με πολύ μικρότερους χρόνους υποδιπλασιασμού παράγονται συνεχώς ως προϊόντα διάσπασης των μητρικών πυρήνων στην αλυσίδα των οποίων ανήκουν. Τέλος, περίπου 1000 τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα έχουν ανακαλυφθεί και διαπιστωθεί.

### \*21.2.4 Τα Σωματίδια α.

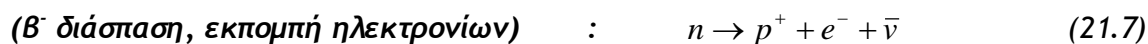
Τα σωματίδια α είναι πυρήνες He και επομένως έχουν ηλεκτρικό φορτίο  $+2e$  και μαζικό αριθμό  $A=3$ . Τα σωματίδια αυτά είναι αποτέλεσμα της α-διάσπασης μητρικών πυρήνων των οποίων ο μαζικός αριθμός  $A$  είναι μεγαλύτερος από το 140. Όταν τα σωματίδια α διέρχονται μέσα από την ύλη χάνουν ενέργεια κυρίως λόγω του ιονισμού τον οποίο προκαλούν στα άτομα της ύλης. Το ολικό μήκος της τροχιάς που θα διαγράψει ένα σωματίδιο α μέσα στην ύλη μέχρι αυτό να χάσει την ενέργειά του ονομάζεται *εμβέλεια*. Η εμβέλεια των σωματιδίων α εξαρτάται από την κινητική ενέργεια αυτών. Πρέπει να σημειώσουμε εδώ ότι σε μια δέσμη μονοενεργειακών σωματιδίων α, όλα τα σωματίδια δεν έχουν ακριβώς την ίδια εμβέλεια. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη στατιστική φύση των ιονιστικών κρούσεων των σωματιδίων α με τα άτομα της ύλης. Για τον υπολογισμό της μέσης εμβέλειας  $\bar{L}$  των σωματιδίων α στον αέρα υπάρχουν διάφορες εμπειρικές σχέσεις. Για παράδειγμα, η σχέση:

$$\bar{L} = (0.005E + 0.285)E^{3/2} \text{ cm} \quad (21.6)$$

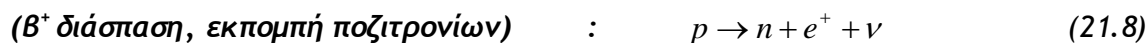
όπου  $E$  είναι η κινητική ενέργεια των σωματιδίων α, ισχύει για ενέργειες  $E$  που βρίσκονται στη περιοχή από 4 έως 11 MeV. Από τη ΣΧΕΣΗ (21.6) προκύπτει ότι για τη δεδομένη περιοχή ενεργειών, η μέση εμβέλεια  $L$  των σωματιδίων α είναι μεταξύ των 2 cm και 10 cm. Αντίθετα, η εμβέλεια των σωματιδίων α μέσα στα στερεά είναι τόσο μικρή, ώστε η ενέργειά τους να απορροφάται σε πάχη της τάξης μερικών δεκάδων μικρών ( $1 \mu = 10^{-6}m$ ).

### \*21.2.5 Τα Σωματίδια β.

Τα σωματίδια β μπορεί να είναι ηλεκτρόνια ή ποζιτρόνια, τα οποία προκύπτουν κατά τη β-διάσπαση ενός ραδιενερού πυρήνα. Στη διάσπαση αυτή ο μαζικός αριθμός (σύνολο πρωτονίων και νετρονίων) παραμένει αμετάβλητος ενώ ο ατομικός αριθμός (αριθμός πρωτονίων) μεταβάλλεται κατά μια μονάδα. Δεδομένου τώρα ότι τα ηλεκτρόνια ή τα ποζιτρόνια που εκπέμπονται δεν είναι συστατικά του πυρήνα, πρέπει να δεχθούμε ότι η μεταβολή του ατομικού αριθμού, που παρατηρείται μεταξύ του μητρικού και του θυγατρικού πυρήνα, οφείλεται στη μετατροπή ενός πρωτονίου σε νετρόνιο ή αντίστροφα. Κατά τη διαδικασία της β-διάσπασης, μέσα στο πυρήνα λαμβάνουν χώρα και μετατροπές του είδους:



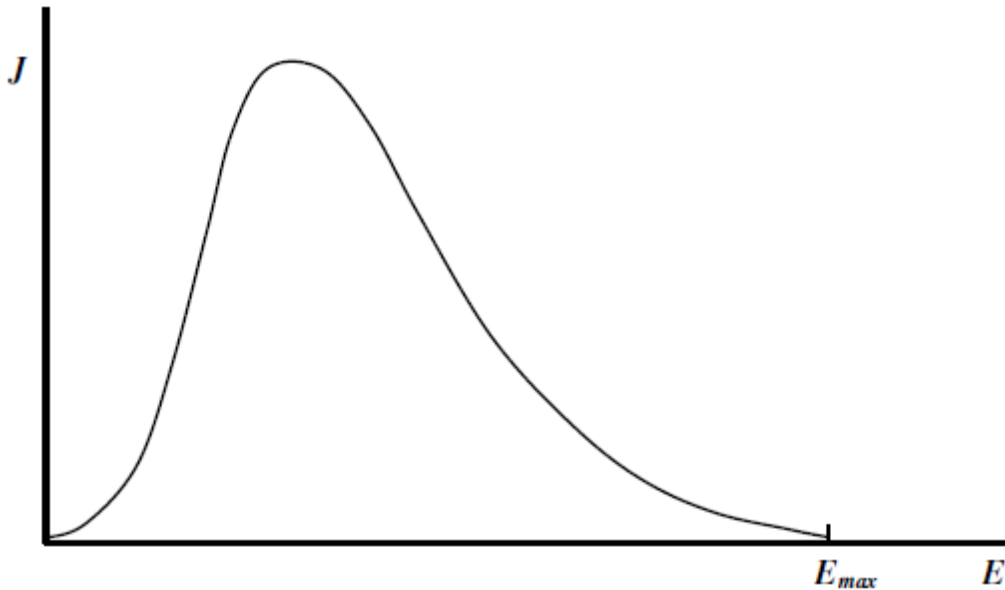
ή του είδους:



όπου  $e^-$ ,  $e^+$ ,  $p^+$  και  $n$  είναι το ηλεκτρόνιο, το ποζιτρόνιο, το πρωτόνιο και το νετρόνιο, αντίστοιχα. Επίσης, το  $\nu$  και το  $\bar{\nu}$  είναι το νεutrino και το αντινεutrino, αντίστοιχα. Τα νεutrino είναι ουδέτερα σωματίδια με μηδενική μάζα ηρεμίας και spin  $\frac{1}{2}$  και τα οποία αλληλεπιδρούν με την ύλη πολύ ασθενικά. Οι αλληλεπιδράσεις των νεutrino με την ύλη αντιστοιχούν στις καλούμενες ασθενείς αλληλεπιδράσεις, οι οποίες μαζί με τις πυρηνικές, τις ηλεκτρομαγνητικές και τις βαρυτικές δυνάμεις αποτελούν τα τέσσερα βασικά είδη δυνάμεων τα οποία είναι υπεύθυνα για τη συγκρότηση του πυρήνα των ατόμων. Μέσα στο νερό, η ελεύθερη διαδρομή των νεutrino που έχουν ενέργεια 1.5 MeV είναι της τάξης των 3600 έτη φωτός. Μέσα στο

μόλυβδο, η διαδρομή αυτή είναι της τάξης των 50 έτη φωτός. Για το λόγο αυτό είναι πρακτικά αδύνατη η ανίχνευση των νετρίνο.

Σε αντίθεση με το σχεδόν γραμμικό ενεργειακό φάσμα των σωματιδίων  $\alpha$ , τα σωματίδια  $\beta$  έχουν **συνεχές** φάσμα. Ένα τυπικό ενεργειακό φάσμα σωματιδίων  $\beta$  φαίνεται στο ΣΧΗΜΑ 21.1. Το φάσμα αυτό παρουσιάζει ένα μέγιστο στην ένταση  $J$  καθώς και μια μέγιστη ενέργεια  $E_{max}$  η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη κινητική ενέργεια που μπορεί να έχουν τα σωματίδια  $\beta$ . Η ενέργεια αυτή αποτελεί μια χαρακτηριστική παράμετρο της  $\beta$ -διάσπασης δεδομένου ότι η ενέργεια αυτή καθορίζει την εμβέλεια των σωματιδίων  $\beta$  μέσα στην ύλη.



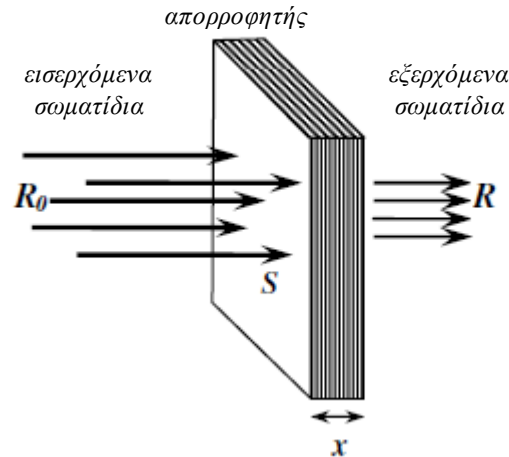
ΣΧΗΜΑ 21.1

Κατά τη κίνηση των σωματιδίων  $\beta$  μέσα στην ύλη, αυτά αλλάζουν συνεχώς τη διεύθυνση της κίνησής τους, εξαιτίας της πολύ μικρής μάζας που έχουν και κατά τη διαδρομή τους σχηματίζουν πολύ μικρό αριθμό ζευγών ιόντων. Κατά συνέπεια, για να απορροφηθεί η ενέργεια των σωματιδίων  $\beta$  πρέπει αυτά να διανύσουν μεγάλη διαδρομή μέσα στην ύλη. Προκύπτει λοιπόν ότι τα σωματίδια αυτά, σε αντίθεση με τα σωματίδια  $\alpha$ , έχουν μικρότερη ικανότητα ιονισμού αλλά μεγαλύτερη διεισδυτικότητα.

Όταν μια δέσμη σωματιδίων  $\beta$  εισέρχεται μέσα σε κάποιο υλικό τότε (ΣΧΗΜΑ 21.2), ο αριθμός  $R$  των σωματιδίων που φθάνουν ανά μονάδα χρόνου σε βάθος  $x$  μέσα στο υλικό ακολουθεί τον εκθετικό νόμο:

$$R = R_0 \cdot e^{-\mu_\beta \cdot x} \quad (21.9)$$

όπου  $R_0$  είναι ο αριθμός των σωματιδίων  $\beta$  που εισέρχονται ανά μονάδα χρόνου μέσα στο υλικό και  $\mu_\beta$  είναι ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης των σωματιδίων αυτών (βλέπε ΣΧΗΜΑ 21.3).



ΣΧΗΜΑ 21.2

Πρέπει να σημειώσουμε εδώ ότι, στην καμπύλη απορρόφησης κάθε ραδιενεργού ακτινοβολίας, το πάχος ή βάθος  $x$  του απορροφητικού υλικού εκφράζεται ισοδύναμα με τη παράμετρο της επιφανειακής πυκνότητας  $\sigma$  η οποία ορίζεται ως το *πηλίκιο της μάζας του απορροφητή δια την ενεργό επιφάνεια  $S$*  αυτού που είναι κάθετη στη πορεία της δέσμης της ακτινοβολίας. Από τον ορισμό της πυκνότητας  $\rho$  ενός υλικού έχουμε ότι:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{S \cdot x} = \left(\frac{m}{S}\right) \cdot \frac{1}{x}$$

Οπότε,

$$\sigma \equiv \frac{m}{S} = \rho \cdot x \quad (21.10)$$

Οπότε, από τις ΣΧΕΣΕΙΣ (21.9) και (21.10) θα έχουμε τη σχέση:

$$R = R_0 \cdot e^{-\mu_\beta \frac{\sigma}{\rho}} \Rightarrow$$

$$R = R_0 \cdot e^{-\frac{\mu_\beta \cdot \sigma}{\rho}} \quad (21.11)$$

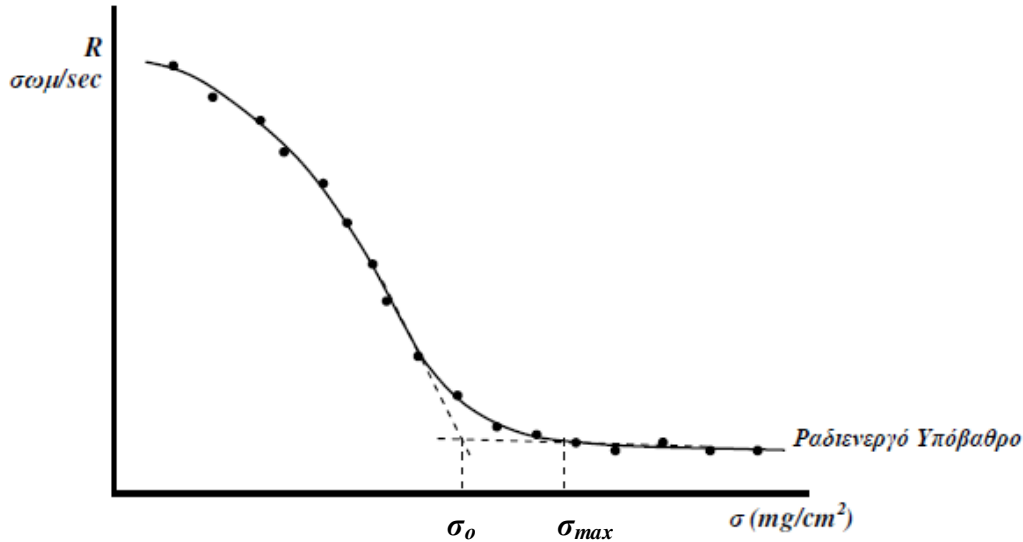
Εαν ορίσουμε την παράμετρο  $K_\beta \equiv \frac{\mu_\beta}{\rho}$ , τότε η ΣΧΕΣΗ (21.11) γίνεται:

$$\boxed{R = R_0 \cdot e^{-K_\beta \cdot \sigma}} \quad (21.12)$$

όπου  $K_\beta$  είναι ο *μαζικός συντελεστής εξασθένισης των σωματιδίων  $B$*  από το υλικό του απορροφητή. Ο συντελεστής αυτός είναι σχεδόν *ανεξάρτητος από τον ατομικό αριθμό  $Z$  του απορροφητή*. Μια εμπειρική σχέση που δίνει προσεγγιστικά το μαζικό συντελεστή απορρόφησης  $K_\beta$  σε συνάρτηση με την μέγιστη ενέργεια  $E_{max}$  των σωματιδίων  $B$  είναι η ακόλουθη:

$$K_{\beta} = \frac{17}{E_{\max}^{1.43}} \quad \text{για} \quad 0.15 < E_{\max} < 3.5 \text{ MeV} \quad (21.13)$$

όπου η ενέργεια  $E_{\max}$  εκφράζεται σε MeV και ο συντελεστής  $K_{\beta}$  σε  $\text{cm}^2/\text{gr}$ .



ΣΧΗΜΑ 21.3

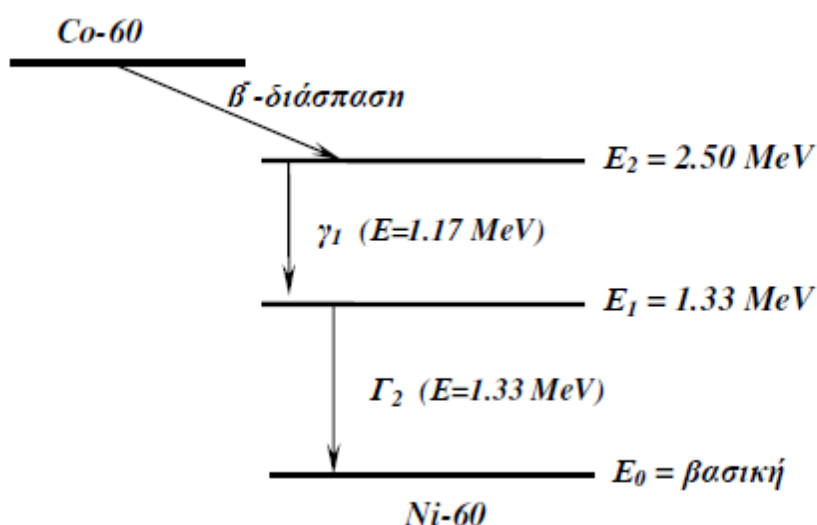
Στη καμπύλη του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 21.3 παρατηρούμε ότι πέρα από ένα οριακό βάθος  $\sigma_{\max}$ , τα σωματίδια  $\beta$  απορροφούνται (χάνουν την ενέργειά τους) σε αντίθεση με τη συνυπάρχουσα ακτινοβολία  $\gamma$  η οποία συνεχίζει να διαδίδεται και σε βάθη μεγαλύτερα από το  $\sigma_{\max}$  (βλέπε ραδιενεργό υπόβαθρο στη καμπύλη του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 21.3). Η τιμή  $\sigma_{\max}$  της μέγιστης εμβέλειας των σωματιδίων  $\beta$  μέσα στην ύλη είναι πολύ δύσκολο να υπολογιστεί θεωρητικά και πειραματικά. Για το λόγο αυτό έχουν προταθεί διάφορες εμπειρικές σχέσεις, οι οποίες αναφέρονται και ως σχέσεις εμβέλειας - ενέργειας, και οι οποίες δίνουν την εμβέλεια  $\sigma_{\max}$  σε συνάρτηση της μέγιστης ενέργειας  $E_{\max}$  των σωματιδίων  $\beta$ . Η πιο γνωστή εμπειρική σχέση εμβέλειας - ενέργειας είναι αυτή που προτάθηκε από τον Feather και η οποία χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα σε συνδυασμό με τη καμπύλη απορρόφησης των σωματιδίων  $\beta$ . Σύμφωνα με τη πρόταση του Feather ισχύει:

$$E_{\max} = \frac{\sigma_{\max} + 160}{543} \quad \text{για} \quad 0.8 < E_{\max} < 3 \text{ MeV} \quad (21.14)$$

όπου η εμβέλεια  $\sigma_{\max}$  των σωματιδίων μετριέται σε  $\text{mgr/cm}^2$  (δηλαδή εκφράζεται σε επιφανειακή πυκνότητα) και η ενέργεια  $E_{\max}$  μετριέται σε MeV.

### \*21.2.6 Ακτινοβολία γ.

Κατά την α-διάσπαση, αλλά και κατά τη β-διάσπαση ο θυγατρικός πυρήνας που προκύπτει είναι πάντοτε διεγερμένος. Αυτό σημαίνει ότι μετά τη πυρηνική διάσπαση, η ενέργεια των νουκλεονίων του πυρήνα είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια της θεμελιώδους κατάστασης και ως εκ τούτου, αμέσως μετά τη διάσπαση, ο πυρήνας αποδιεγείρεται εκπέμποντας ταυτόχρονα μια πάρα πολύ σκληρή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η οποία ονομάζεται ακτινοβολία γ και της οποίας το μήκος κύματος είναι πολλές φορές μικρότερο από το μήκος κύματος των ακτίνων Χ. Από το γεγονός τώρα ότι η ενέργεια των νουκλεονίων του πυρήνα είναι κβαντισμένη, προκύπτει ότι το φάσμα της ακτινοβολίας γ θα είναι γραμμικό. Ένα τυπικό ενεργειακό διάγραμμα διεγερμένου πυρήνα δίνεται στο ΣΧΗΜΑ 21.4 το οποίο προέκυψε από τη β-διάσπαση του ραδιενεργού στοιχείου Co-60.



ΣΧΗΜΑ 21.4

Από το ενεργειακό διάγραμμα του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 21.4 προκύπτει ότι κατά την εκπομπή της ακτινοβολίας γ ο μαζικός και ο ατομικός αριθμός του ραδιενεργού στοιχείου δεν μεταβάλλονται. Η δημιουργία του θυγατρικού στοιχείου Ni-60 οφείλεται αποκλειστικά και μόνο στη διαδικασία της β<sup>-</sup> διάσπασης του μητρικού στοιχείου Co-60.

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει, το μήκος κύματος της ακτινοβολίας γ είναι πολλές φορές μικρότερο από το μήκος κύματος των ακτίνων Χ. Το γεγονός αυτό εξηγεί και το λόγο για τον οποίο τα γωτόνια γ έχουν πολύ μεγάλη εμβέλεια μέσα στην ύλη. Εύκολα διαπιστώνεται πειραματικά ότι η ένταση J της ακτινοβολίας γ μειώνεται εκθετικά σε σχέση με το βάθος x που διανύει αυτή μέσα στην ύλη. Συγκεκριμένα:

$$J = J_0 \cdot e^{-\mu_\gamma \cdot x} \quad (21.15)$$

όπου  $J_0$  είναι η ένταση της ακτινοβολίας κατά την είσοδο αυτής μέσα στην ύλη και  $\mu_\gamma$  είναι ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης της ακτινοβολίας. Ο συντελεστής  $\mu_\gamma$  εξαρτάται από τη φύση του υλικού αλλά και από την ενέργεια των φωτονίων γ.



Από τη ΣΧΕΣΗ (21.15) προκύπτουν δυο πολύ ενδιαφέρουσες παράμετροι για τα απορροφητικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην ακτινοβολία  $\gamma$ . Οι παράμετροι αυτοί είναι το **πάχος υποδιπλασιασμού**  $d_{1/2}$  του και η **μέση εμβέλεια**  $L_{av}$  της ακτινοβολίας  $\gamma$  μέσα στην ύλη.

Το **πάχος υποδιπλασιασμού**  $d_{1/2}$  ισούται με το πάχος εκείνο του απορροφητή για το οποίο η ένταση της ακτινοβολίας  $\gamma$  είναι ίση με  $J_0/2$ . Οπότε, από τη ΣΧΕΣΗ (21.15) θα έχουμε:

$$\frac{J_0}{2} = J_0 e^{-\mu_\gamma d_{1/2}} \Rightarrow e^{\mu_\gamma d_{1/2}} = 2 \Rightarrow d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

$$d_{1/2} = \frac{0.693}{\mu} \quad (21.16)$$

Η **μέση εμβέλεια** της ακτινοβολίας  $\gamma$  μέσα στην ύλη ισούται με το μάχος  $L_{av}$  του απορροφητή για το οποίο η ένταση της ακτινοβολίας είναι ίση με  $J_0/e$ . Οπότε, από τη ΣΧΕΣΗ (21.15) θα έχουμε:

$$\frac{J_0}{e} = J_0 e^{-\mu_\gamma L_{av}} \Rightarrow e^{\mu_\gamma L_{av}} = e \Rightarrow \mu_\gamma L_{av} = \ln(e) = 1 \Rightarrow$$

$$L_{av} = \frac{1}{\mu} \quad (21.17)$$

Στη περίπτωση που το πάχος του απορροφητή δίνεται σε  $cm$ , ο συντελεστής  $\mu$  θα εκφράζεται σε  $cm^{-1}$ . Στη περίπτωση όμως που το πάχος αυτό εκφράζεται με την επιφανειακή πυκνότητα  $\sigma$  του απορροφητή, από τη ΣΧΕΣΗ (21.15) και από τη σχέση που δίνει την επιφανειακή πυκνότητα  $\sigma$ , (βλέπε ΣΧΕΣΗ 21.10), θα έχουμε:

$$J = J_0 e^{-\mu_\gamma \frac{\sigma}{\rho}} \Rightarrow$$

$$J = J_0 e^{-K_\gamma \sigma} \quad (21.18)$$

όπου:

$$K_\gamma = \frac{\mu_\gamma}{\rho} \quad (21.19)$$

είναι η παράμετρος  $K_\gamma$  αποτελεί το μαζικό συντελεστή εξασθένησης της ακτινοβολίας  $\gamma$ .

### 21.2.7 Μηχανισμοί απορρόφησης της ραδιενεργής ακτινοβολίας από την ύλη

Οι μηχανισμοί απορρόφησης της ακτινοβολίας  $\gamma$  από την ύλη είναι τελείως διαφορετικοί από τους αντίστοιχους μηχανισμούς των σωματιδίων  $\alpha$  και  $\beta$ . Για μεν τα σωματίδια  $\alpha$  και  $\beta$  η απορρόφησή τους οφείλεται στις συγκρούσεις των σωματιδίων αυτών με τα άτομα και τα ηλεκτρόνια του απορροφητικού υλικού και τη δημιουργία ιόντων. Για δε την ακτινοβολία  $\gamma$ , τα φωτόνια είναι δυνατόν να απορροφηθούν αλλά και να σκεδαστούν εξαιτίας τριών (3) βασικών φαινομένων, τα οποία συνήθως λαμβάνουν χώρα κατά την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας  $\gamma$  με την ύλη. Τα φαινόμενα αυτά είναι:

1. Το **Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο**: Το φαινόμενο αυτό αντιστοιχεί στη πλήρη απορρόφηση ενός αριθμού φωτονίων από ίσο αριθμό τροχιακών ηλεκτρονίων τα οποία και εξέρχονται με κινητική ενέργεια από την επιφάνεια του απορροφητικού υλικού. Για τον ποσοτικό προσδιορισμό αυτού του τύπου απορρόφησης χρησιμοποιείται η παράμετρος  $\tau$  η οποία ονομάζεται **μαζικός συντελεστής φωτοηλεκτρικής απορρόφησης**.
2. Το **Φαινόμενο Compton**: Το φαινόμενο αυτό αντιστοιχεί στη σκέδαση ενός αριθμού φωτονίων από ίσο αριθμό ελεύθερων ηλεκτρονίων του απορροφητή. Εξ αιτίας αυτού του φαινομένου, η ακτινοβολία  $\gamma$  υφίσταται και πρόσθετη εξασθένιση. Η εξασθένιση αυτή εξαρτάται από το **μαζικό συντελεστή σκέδασης Compton  $\sigma$** .
3. Το **Φαινόμενο της Δίδυμης Γέννησης**: Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται στις περιπτώσεις εκείνες όπου η ενέργεια ενός φωτονίου  $\gamma$  είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των μαζών ηρεμίας του ηλεκτρονίου και του ποζιτρονίου. Στη περίπτωση αυτή ένα φωτόνιο  $\gamma$  μετατρέπεται σε ζεύγος ποζιτρονίου-ηλεκτρονίου με τελικό αποτέλεσμα η ακτινοβολία  $\gamma$  να υφίσταται και άλλη εξασθένιση. Η εξασθένιση αυτή εξαρτάται από το **μαζικό συντελεστή δίδυμης γέννησης  $\kappa$** .

Πρέπει να σημειώσουμε εδώ ότι ο μαζικός συντελεστής εξασθένισης  $K_\gamma$  της ακτινοβολίας  $\gamma$  από ένα απορροφητικό υλικό είναι ίσος με το άθροισμα των παραμέτρων  $\tau$ ,  $\sigma$ , και  $\kappa$ . Συγκεκριμένα:

$$K_\gamma = \tau + \sigma + \kappa \quad (21.20)$$

Επίσης, οι επί μέρους μαζικοί συντελεστές  $\tau$ ,  $\sigma$  και  $\kappa$ , και φυσικά ο μαζικός συντελεστής  $K_\gamma$ , εξαρτώνται τόσο από τον ατομικό αριθμό  $Z$  του απορροφητή όσο και από την ενέργεια  $E$  των φωτονίων (βλέπε ΠΙΝΑΚΑ 21.1).

ΠΙΝΑΚΑΣ 21.1

Αλληλεπίδραση Φωτονίων με την Ύλη	Εξάρτηση από τον Ατομικό Αριθμό $Z$ του Απορροφητή	Εξάρτηση από την Ενέργεια των Φωτονίου
Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο (παράμετρος $\tau$ )	$Z^4$ έως $Z^5$	$E^{-3.5}$ έως $E^{-1}$
Φαινόμενο Compton (παράμετρος $\sigma$ )	$Z$	$E^{-1}$
Δίδυμη Γέννηση (παράμετρος $\kappa$ )	$Z^2$	$\ln(E)$

### 21.2.8 Μέθοδοι Μέτρησης της Ραδιενέργειας.

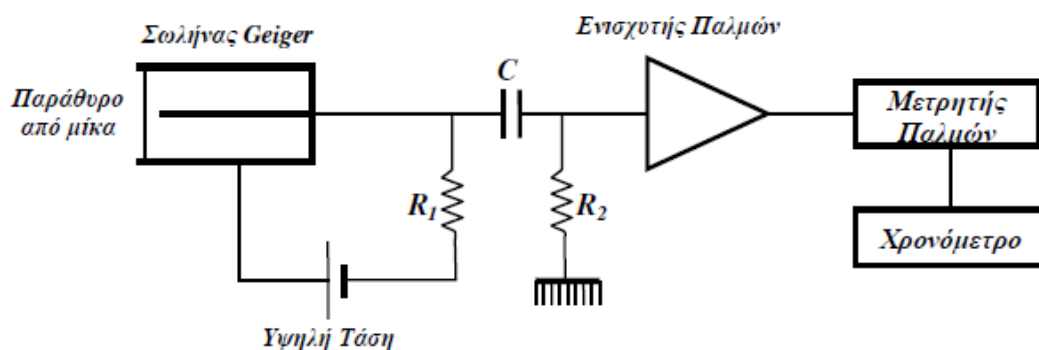
Όλες οι μέθοδοι ανίχνευσης και μέτρησης της ραδιενέργειας στηρίζονται πάνω στους μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα κατά την αλληλεπίδραση των σωματιδίων  $\alpha$  και  $\beta$  και της ακτινοβολίας  $\gamma$  με την ύλη και τα οποία έχουν σαν αποτέλεσμα των ιονισμό ή και τη διέγερση των ατόμων. Τα κυριότερα συστήματα ανίχνευσης και μέτρησης της ραδιενέργειας είναι ο θάλαμος *Wilson*, ο θάλαμος ιονισμού, οι απαριθμητές και οι απαριθμητές σπινθηρισμών. Παρακάτω δίνουμε μια γενική περιγραφή των συστημάτων αυτών.

#### A. Ο Θάλαμος Wilson.

Ο θάλαμος αυτός περιέχει μίγμα αέρος και κεκορεσμένων υδρατμών. Με απότομη εκτόνωση του συστήματος το μίγμα ψύχεται και παράγονται υπέρκοροι ατμοί οι οποίοι κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις σχηματίζουν σταγονίδια. Οι προϋποθέσεις αυτές έχουν σχέση με την ύπαρξη πυρήνων συγκέντρωσης για το σχηματισμό των σταγονιδίων. Τέτοιοι πυρήνες είναι συνήθως τα ιόντα τα οποία μπορεί να υπάρξουν μέσα στους υπέρκορους ατμούς του θαλάμου. Σύμφωνα με την ανάλυση αυτή, αν μέσα στο θάλαμο *Wilson* εισέλθουν σωματίδια  $\alpha$  ή  $\beta$  και ταυτόχρονα εκτονώσουμε το αέριο μίγμα, τότε κατά μήκος της τροχιάς των σωματιδίων θα δημιουργηθούν ιόντα και κατά συνέπεια σταγονίδια τα οποία θα είναι ορατά. Κάτω από αυτές τις συνθήκες θα δημιουργηθούν σειρές σταγονιδίων υπό μορφή γραμμών οι οποίες θα αντιστοιχούν στις τροχιές των σωματιδίων. Στο θάλαμο *Wilson* είναι προσαρμοσμένη και φωτογραφική μηχανή για τη φωτογράφιση των τροχικών αυτών.

#### \*B. Ο Απαριθμητής Geiger.

Ο απαριθμητής *Geiger* αποτελεί ίσως το απλούστερο όργανο για την ανίχνευση και τη μέτρηση της ραδιενέργειας. Ο απαριθμητής αυτός αποτελείται από ένα μεταλλικό κυλινδρικό σωλήνα και από ένα λεπτό μεταλλικό σύρμα το οποίο είναι τοποθετημένο κατά μήκος του άξονα του κυλινδρικού σωλήνα. Μέσα στο σωλήνα υπάρχει ευγενές αέριο σε χαμηλή πίεση. Το ένα άκρο του σωλήνα αποτελεί το παράθυρο εισόδου της ραδιενέργειας και για το λόγο αυτό φράσσεται με μίκα. Η επιλογή της μίκας κρίνεται επιτυχής, δεδομένου ότι αυτή παρουσιάζει μικρή απορροφητική ικανότητα τόσο στην ακτινοβολία  $\gamma$  όσο και στα σωματίδια  $\beta$ .



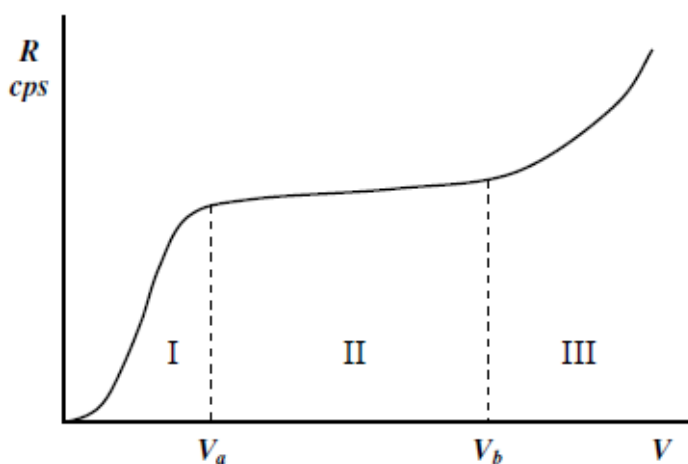
ΣΧΗΜΑ 21.5

Μεταξύ του ομοαξονικού σύρματος και του μεταλλικού σωλήνα εφαρμόζεται υψηλή τάση, τόσο ώστε να μη προκαλείται ηλεκτρική εκκένωση. Στο ΣΧΗΜΑ 21.5 δίνουμε σε σχεδιάγραμμα το κύκλωμα ενός απαριθμητή *Geiger*, το οποίο περιλαμβάνει επίσης το τροφοδοτικό υψηλής τάσης, τον ενισχυτή παλμών και το σύστημα καταμέτρησης των παλμών.

Αν μέσα στο σωλήνα εισέλθει ραδιενεργός ακτινοβολία, τότε δημιουργούνται ζεύγη ηλεκτρικών φορτίων, δηλαδή θετικά ιόντα και ηλεκτρόνια. Τα φορτία αυτά κινούνται εξαιτίας του ηλεκτρικού πεδίου που υπάρχει μεταξύ του ομοαξονικού σύρματος και του μεταλλικού σωλήνα, συγκρούονται με τα άτομα του αερίου και δημιουργούν νέα ιόντα και ηλεκτρόνια. Κάτω από αυτές τις συνθήκες προκαλείται ηλεκτρική εκκένωση η οποία όμως πρέπει να διαρκεί ελάχιστο χρονικό διάστημα, ώστε η απαριθμητική διάταξη να είναι σε θέση να διακρίνει τα ραδιενεργά σωματίδια ή τα φωτόνια  $\gamma$  τα οποία εισέρχονται στο σωλήνα Geiger με όσο το δυνατό μικρή χρονική διαφορά. Η ταχεία απόσβεση της ηλεκτρικής εκκένωσης εξασφαλίζεται με το κύκλωμα σύζευξης που υπάρχει στη καταμετρική διάταξη και που αποτελείται από τις αντιστάσεις  $R_1$ ,  $R_2$  και το πυκνωτή  $C$ .

Κάθε ραδιενεργό σωματίδιο ή φωτόνιο  $\gamma$  που εισέρχεται στο σωλήνα Geiger προκαλεί μια ηλεκτρική εκκένωση που ισοδυναμεί σε στιγμιαίο ηλεκτρικό παλμό. Οι παλμοί αυτοί καταμετρούνται με ηλεκτρονική διάταξη και αντιστοιχούν σε σωματίδια ή φωτόνια που εισέρχονται στον απαριθμητή.

Η επιλογή της τάσης λειτουργίας του απαριθμητή Geiger προκύπτει από τη χαρακτηριστική καμπύλη αυτού. Η καμπύλη αυτή λαμβάνεται εάν μπροστά στο παράθυρο του σωλήνα Geiger τοποθετήσουμε μια ραδιενεργό πηγή και μετράμε τον αριθμό  $R$  των παλμών που καταμετρά η διάταξη σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα συναρτήσει της υψηλής τάσης που εφαρμόζεται. Αρχικά, όσο μεγαλώνει η τάση τόσο μεγαλώνει και ο αριθμός  $R$  των παλμών ανά μονάδα χρόνου (*cps*) (περιοχή I της γραφικής παράστασης του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 21.6). Από μια ορισμένη τάση  $V_a$  μέχρι τη τάση  $V_b$  ο ρυθμός των παλμών που καταμετείται αυξάνεται ελαφρά με την ηλεκτρική τάση (περιοχή II της γραφικής παράστασης του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 21.6). Για ηλεκτρικές τάσεις μεγαλύτερες από τη τάση  $V_b$ , μέσα στο σωλήνα Geiger δημιουργείται αυτοτελής ηλεκτρική εκκένωση η οποία είναι δυνατό να καταστρέψει το μετρητικό σύστημα (περιοχή III της γραφικής παράστασης του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 21.6). Η περιοχή II μεταξύ των τάσεων  $V_a$  και  $V_b$  ονομάζεται πλατώ ή οροπέδιο του απαριθμητή η δε τάση  $V_a$  ονομάζεται τάση κατωφλίου. Ως τάση λειτουργίας του απαριθμητή επιλέγεται συνήθως η τάση  $V_0$  η οποία αντιστοιχεί στο μέσο του οροπεδίου της χαρακτηριστικής καμπύλης  $R=f(V)$ .



ΣΧΗΜΑ 21.6

Η κλίση  $k$  του οροπεδίου της χαρακτηριστικής  $R=f(V)$  δίνει ένα μέτρο της ποιότητας του απαριθμητή. Στον ιδανικό απαριθμητή η κλίση  $k$  είναι ίση με το μηδέν. Στους πραγματικούς απαριθμητές, όσο πιο μικρή είναι η τιμή της κλίσης  $k$  τόσο πιο καλή είναι και η ποιότητας του απαριθμητή.

### 21.2.9 Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες.

Μια ακτινοβολία λέγεται ιοντίζουσα όταν κατά τη διάδοσή της προκαλεί τον ιονισμό των ατόμων ή των μορίων με τα οποία αλληλεπιδρά. Τέτοιες ακτινοβολίες είναι τα σωματίδια  $\alpha$  και  $\beta$ , τα πρωτόνια, τα νετρόνια, η ακτινοβολία  $\gamma$  και οι ακτίνες  $X$ . Στο ΠΙΝΑΚΑ 21.2 δίνουμε περιληπτικά τα χαρακτηριστικά των ιοντίζουσών ακτινοβολιών.

ΠΙΝΑΚΑΣ 21.2

ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	ΤΥΠΟΣ	ΦΟΡΤΙΟ	ΤΡΟΠΟΣ ΙΟΝΙΣΜΟΥ
$\alpha$	Πυρήνες He	+2	Άμεσος
$\beta^-$	Ηλεκτρόνια	-1	Άμεσος
$\beta^+$	Ποζιτρόνια	+1	Άμεσος
$p$	Πρωτόνια	+1	Άμεσος
$n$	Νετρόνια	0	Έμμεσος
$X$	Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία	0	Έμμεσος
$\gamma$	Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία Πυρηνικής Προέλευσης	0	Έμμεσος

### 21.2.10 Μονάδες Μέτρησης της Ακτινοβολίας.

Προκειμένου να εκφραστούν ποσοτικά οι διάφορες έννοιες που αφορούν τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες και τα αποτελέσματά τους απαιτείται ο καθορισμός ενός συστήματος κατάλληλων μονάδων. Η καθιέρωση των μονάδων αυτών έγινε από τον διεθνή οργανισμό *International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU)*, ο οποίος ασχολείται με το πρόβλημα αυτό. Τα κυριότερα μεγέθη που ποσοτικοποιούν οι μονάδες αυτές είναι:

#### A. Η Έκθεση.

Ο όρος αυτός περιγράφει το πεδίο της ακτινοβολίας  $X$  ή  $\gamma$  και έχει σχέση με τον αριθμό των φορτίων που απελευθερώνονται από την ακτινοβολία μέσα σε ορισμένη μάζα αέρα. Η μονάδα μέτρησης είναι το *1 Roentgen (1 R)*:

$$1 R = 2.58 \times 10^{-4} \text{ Coulomb/kg}$$

### B. Η Απορροφούμενη Δόση.

Η απορροφούμενη δόση είναι το ποσό της ενέργειας που αποδίδεται από την ακτινοβολία στη μονάδα μάζα της ύλης. Η μονάδα μέτρησης της ποσότητας αυτής είναι το *1 Rad*:

$$1 \text{ Rad} = 0.01 \text{ Joule/kg}$$

### Γ. Η Ισοδύναμη Δόση.

Η παράμετρος αυτή έχει σχέση με τη βιολογική δράση της ακτινοβολίας πάνω στους ζωντανούς οργανισμούς. Η αναγκαιότητα για τον προσδιορισμό της ισοδύναμης δόσης προκύπτει από το γεγονός ότι τα βιολογικά αποτελέσματα δεν είναι ευθέως ανάλογα με την ενέργεια της ακτινοβολίας που αποδίδεται στον ζωντανό οργανισμό. Αντίθετα, τα βιολογικά αποτελέσματα εξαρτώνται τόσο από την ολική ενέργεια που αποτίθεται στον οργανισμό αλλά και από τον τρόπο με τον οποίο η ενέργεια αυτή κατανέμεται κατά μήκος της τροχιάς της ιοντίζουσας ακτινοβολίας. Έτσι, για την ίδια απορροφούμενη δόση, η βιολογική βλάβη που προκαλούν τα σωματίδια α είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη βλάβη που προκαλεί η ακτινοβολία γ. Για να ληφθούν υπόψη οι διαφορές στα βιολογικά αποτελέσματα, ο ICRU εισήγαγε τον όρο της *Ισοδύναμης Δόσης H*, η οποία ορίζεται με το γινόμενο της *Απορροφούμενης Δόσης D* επί το *Συντελεστή Ποιότητας Q* της ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα:

$$H = D \cdot Q$$

Ο παράγοντας *Q* εξαρτάται από το είδος της ιοντίζουσας ακτινοβολίας καθώς και από την ενέργεια αυτής. Η μονάδα μέτρησης της *Ισοδύναμης Δόσης* είναι το *1 rem* και το *1 Sievert* όπου:

$$1 \text{ Sievert} = 100 \text{ rem}$$

Επειδή ο χρόνος μέσα στον οποίο η ενέργεια της ακτινοβολίας αποδίδεται στην ύλη είναι σημαντικός παράγοντας, χρησιμοποιούνται και οι παρακάτω ποσότητες:

**Ρυθμός Έκθεσης** : με μονάδα το *1 Roentgen/h*.

**Ρυθμός Απορροφούμενης Δόσης** : με μονάδα το *1 rad/h*

**Ρυθμός Ισοδύναμης Δόσης** : με μονάδα το *1 rem/h*

#### 21.2.11 Φυσικές Πηγές Ακτινοβολίας.

Η δόση που δέχεται το ανθρώπινο σώμα από εξωτερική ακτινοβολήση οφείλεται στη **Κοσμική Ακτινοβολία** (σε ποσοστό 17%), στο **Ραδόνιο** (σε ποσοστό 50%) στα ορυκτά και στο έδαφος (σε ποσοστό 20%) και στα τρόφιμα και στο νερό (σε ποσοστό 13%).

Η **Κοσμική Ακτινοβολία** αποτελείται από ενεργοποιημένα σωματίδια, κυρίως πρωτόνια και ιόντα He, τα οποία κινούνται μέσα στο διάστημα. Τα σωματίδια αυτά δημιουργούνται από διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα στον διαστημικό χώρο αλλά και στον Ήλιο. Από την αλληλεπίδραση της κοσμικής ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα της Γης παράγεται δευτερογενής ακτινοβολία η οποία φθάνει στην επιφάνεια της Γης με πολύ μικρή ένταση.

Τα **Φυσικά Ραδιενεργά Υλικά** περιέχονται στο χώμα ή σε διάφορα ορυκτά. Τα υλικά οικοδομών που προέρχονται από τα ορυκτά αυτά αποτελούν μια πρόσθετη πηγή ακτινοβολίας γιατί εκλύουν τα ραδιενεργά αέρια **ραδόνιο** και **θορόνιο**.

Η δόση την οποία δέχεται ο άνθρωπος από εσωτερική ακτινοβολία οφείλεται κυρίως στο φυσικό ραδιενεργό ισότοπο **Κάλιο-40 (K-40)** το οποίο έχει ακριβώς την ίδια χημική συμπεριφορά με το **Κάλιο**. Άλλα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα, τα οποία βρίσκονται στην βιόσφαιρα και τα οποία συνεισφέρουν στη δόση που λαμβάνει εσωτερικά ο άνθρωπος, είναι το **Πλουτόνιο**, το **Ραδόνιο**, το **Ράδιο**, το **Στρόντιο** και το **Θουράνιο**. Τα στοιχεία αυτά επικάθονται κυρίως στα οστά των ανθρώπων.

Στο **ΠΙΝΑΚΑ 21.3** δίνουμε την εκτίμηση της **Μέσης Ετήσιας Ισοδύναμης Δόσης** που λαμβάνει ολόσωμα ο άνθρωπος από τη φυσική ακτινοβολία στις **Η.Π.Α.**

**ΠΙΝΑΚΑΣ 21.3**

<b>ΠΗΓΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ</b>	<b>ΕΤΗΣΙΑ ΔΟΣΗ (σε mrem)</b>
<i>Κοσμική Ακτινοβολία</i>	<i>44</i>
<i>Γήινη Ακτινοβολία</i>	
<i>Εξωτερική</i>	<i>40</i>
<i>Εσωτερική</i>	<i>18</i>
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>102</b>

### **21.2.12 Επίδραση των Ακτινοβολιών στον Άνθρωπο.**

Το γεγονός ότι οι ιοντίζουσες ακτινοβολίες είναι επιβλαβείς για τον άνθρωπο είχε γίνει γνωστό από τις αρχές του προηγούμενου αιώνα. Οι ακτίνες Χ ήταν το πρώτο είδος ιοντίζουσας ακτινοβολίας που παρουσίασε παρατηρήσιμα αποτελέσματα. Άλλη επιστημονική πληροφορία προέκυψε από το γεγονός ότι όσοι άνθρωποι χρησιμοποιούσαν το στοιχείο **Ράδιο** για φωσφορίζουσες επαφές (περίοδος 1925 - 1926) προσβλήθηκαν από καρκίνο. Επίσης, πριν από την ανακάλυψη των ακτίνων Χ είχε παρατηρηθεί ότι οι εργάτες των ορυχείων της Σαξωνίας και της Βοημίας πέθαιναν μετά από 5 έως 10 χρόνια εργασίας από μια ασθένεια η οποία ήταν γνωστή ως ασθένεια των μεταλλορύχων. Στα ορυχεία αυτά υπάρχουν πλούσια κοιτάσματα ουρανίου και αυξημένη συγκέντρωση του ραδιενεργού αερίου **Ραδόνιο-222**.

Αργότερα εμφανίστηκε στο προσκήνιο η λευχαιμία και αποδείχθηκε ότι οι ιοντίζουσες ακτινοβολίες, ανεξάρτητα από τη προέλευσή τους, μπορούν να προκαλέσουν καρκινοπάθειες. Τα βλαβερά αποτελέσματα των ιοντιζουσών ακτινοβολιών διαιρούνται σε δυο κατηγορίες, στα σωματικά τα οποία εμφανίζονται αποκλειστικά και μόνο στα άτομα που έχουν εκτεθεί στην ακτινοβολία και στα γενετικά τα οποία μεταβιβάζονται στους απογόνους των ατόμων που έχουν εκτεθεί στην ακτινοβολία.

Τα σπουδαιότερα σωματικά αποτελέσματα είναι οι κακοήθεις όγκοι, η λευχαιμία, ο καταρράκτης στα μάτια, οι βλάβες του δέρματος και η μείωση του χρόνου ζωής από μη καθορισμένα αίτια. Επίσης, τα σωματικά αποτελέσματα διακρίνονται σε άμεσα και σε όψιμα. Τα άμεσα αποτελέσματα προέρχονται από υψηλές απορροφούμενες δόσεις (πάνω από 50 rad)

που λαμβάνονται μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα. Τα όψιμα αποτελέσματα συνδέονται με μακροχρόνιες χαμηλές δόσεις.

Στο ΠΙΝΑΚΑ 21.4 δίνουμε τα άμεσα αποτελέσματα που προέρχονται από την ολόσωμη έκθεση του ανθρώπου σε ακτινοβολία Χ ή γ.

ΠΙΝΑΚΑΣ 21.3

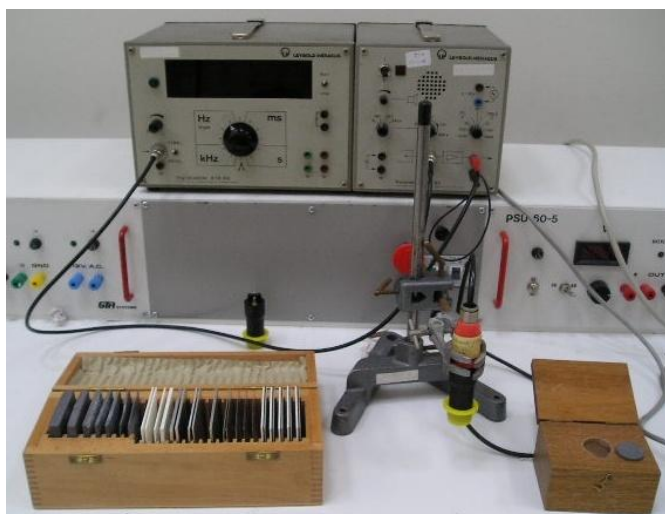
	ΔΟΣΗ (σε rad)	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ
ΧΑΜΗΛΗ ΔΟΣΗ	0 - 25	Κανένα κλινικό διαγνωστικό αποτέλεσμα. Πολύ μικρή πιθανότητα για όψιμο επιβλαβές αποτέλεσμα.
	50	Ελαφρές μεταβατικές αιματολογικές μεταβολές Πιθανή η εμφάνιση όψιμων επιβλαβών αποτελεσμάτων Απίθανη η εμφάνιση σοβαρών αποτελεσμάτων
ΜΕΤΡΙΑ ΔΟΣΗ	100	Ναυτία, κόπωση και πιθανόν έμετοι για δόσεις άνω των 125 rad. Αλλαγές στην αιματολογική εικόνα με καθυστερημένη επαναφορά. Μείωση του χρόνου ζωής.
	200	Ναυτία και έμετοι μέσα σε 24 ώρες. Μετά από μια λανθάνουσα περίοδο (περίπου μιας εβδομάδας) ακολουθούν τριχόπτωση, απώλεια όρεξης, γενική αδυναμία και διάρροια Ενδεχόμενος θάνατος μέσα σε δυο (2) έως έξι (6) εβδομάδες.
ΗΜΙΘΑΝΑΤΗΦΟΡΑ ΔΟΣΗ	400	Ναυτία και έμετοι μέσα σε 1 έως 2 ώρες. Μετά από μια λανθάνουσα περίοδο μιας εβδομάδας αρχίζουν η τριχόπτωση, η απώλεια όρεξης και γενική αδυναμία που συνοδεύεται με πυρετό. Ισχυρή φλόγωση στο στόμα και στο λαιμό (τρίτη εβδομάδα). Τη τέταρτη εβδομάδα εμφανίζεται χλωμάδα, διάρροια, αιμορραγία μύτης και ταχεία απώλεια βάρους. Μερικοί θάνατοι σε δυο (2) έως έξι (6) εβδομάδες. Το 50% των ατόμων που έχουν εκτεθεί στη δόση αυτή θα πεθάνει.
ΘΑΝΑΤΗΦΟΡΑ ΔΟΣΗ	600	Ναυτία και έμετοι μέσα σε 1 ως 2 ώρες. Ακολουθεί σύντομη λανθάνουσα περίοδος. Διάρροια, έμετοι, φλόγωση του στόματος και του λαιμού κατά το τέλος της πρώτης εβδομάδας. Πυρετός, ταχεία απώλεια βάρους και θάνατος από τη πρώτη εβδομάδα. Όλα σχεδόν τα άτομα που εκτίθενται στη δόση αυτή πεθαίνουν.



### 21.3 ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Για τη πραγματοποίηση της εργαστηριακής αυτής άσκησης θα γίνει με τη πειραματική διάταξη που φαίνεται στο ΣΧΗΜΑ 21.7 η οποία περιλαμβάνει τα παρακάτω εξαρτήματα, όργανα και υλικά:

1. Μια ραδιενεργό πηγή σωματιδίων β, στροντίου-90 ( $Sr-90$ ).
2. Ένα σωλήνα Geiger μαζί με το σύστημα στήριξης αυτού
3. Το σύστημα τροφοδοσίας με τάση του σωλήνα Geiger.
4. Ένα σύστημα καταμέτρησης των παλμών που παράγονται από τα σωματίδια β που εισέρχονται στο σωλήνα Geiger. Το σύστημα αυτό έχει ενσωματωμένο χρονόμετρο.
5. Φύλλα αλουμινίου διαφορετικών παχών. Το πάχος των αλουμινίων μετράται σε  $mgr/cm^2$ . Τα φύλλα αυτά θα χρησιμοποιηθούν ως απορροφητικά υλικά για τα σωματίδια β. Η πυκνότητα  $\rho$  του αλουμινίου είναι:  $\rho_{Al} = 2.7 \text{ gr/cm}^3$ .



ΣΧΗΜΑ 21.7

## 21.4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

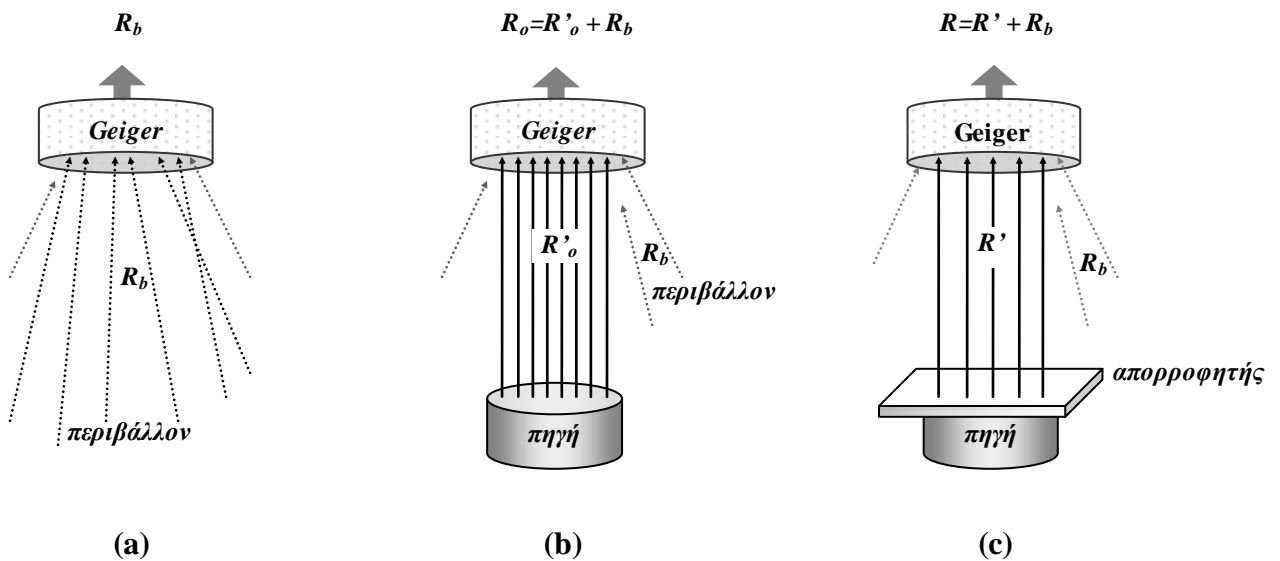
Όπως ήδη αναφέραμε και στη παράγραφο 21.2.5, η εξασθένιση των σωματιδίων  $\beta$  μέσα στην ύλη εξαρτάται περίπου εκθετικά από το πάχος του υλικού (ΣΧΕΣΗ 21.9 ή 21.12). Πρέπει να σημειώσουμε εδώ ότι η απαριθμητική διάταξη καταμετρά ταυτόχρονα με τα σωματίδια  $\beta$  και τη ραδιενέργεια του περιβάλλοντος (υπόβαθρο, background) η οποία έχει ένταση  $R_b$  (σωματίδια ανά sec). Πράγματι, τα σωματίδια που εισέρχονται μέσα στον απαριθμητή Geiger προέρχονται τόσο από αυτή καθαυτή τη ραδιενεργό πηγή, όσο και από το περιβάλλον, δεδομένου ότι το περιβάλλον έχει και φυσική ραδιενέργεια, η οποία προέρχεται από τη κοσμική ακτινοβολία, το ραδόνιο κλπ, αλλά και τεχνητή ραδιενέργεια, η οποία προέρχεται από τις πυρηνικές δοκιμές, τα πυρηνικά ατυχήματα κλπ. Κατά συνέπεια, αν  $R_b$  είναι ο ρυθμός με τον οποίο τα σωματίδια της ραδιενέργειας του περιβάλλοντος εισέρχονται μέσα στον απαριθμητή, και  $R_o$  είναι ο ολικός ρυθμός σωματιδίων που εισέρχονται στον απαριθμητή και καταμετρώνται από αυτόν (δες ΣΧΗΜΑ 21.8b), τότε ο ολικός ρυθμός σωματιδίων που εξέρχονται από τη ραδιενεργό πηγή θα είναι ίσος με:

$$R'_o = R_o - R_b \quad (21.21)$$

Όταν τοποθετηθεί απορροφητικό υλικό μεταξύ της πηγής και του απαριθμητή (δες ΣΧΗΜΑ 21.8c), ο ολικός αριθμός των σωματιδίων  $R$  που καταγράφονται στη μονάδα του χρόνου, είναι το άθροισμα των αριθμών των σωματιδίων που εξέρχονται από το απορροφητικό υλικό και από το περιβάλλον  $R_b$ . Τότε ο ρυθμός  $R'$  των σωματιδίων που εξέρχονται από το απορροφητικό υλικό και προέρχονται από τη ραδιενεργό πηγή θα είναι ίσος με:

$$R' = R - R_b \quad (21.22)$$

Σημειώνουμε εδώ ότι, για να προσδιορίσουμε τον ρυθμό  $R_b$  των σωματιδίων που προέρχονται από το περιβάλλον, απομακρύνουμε την ραδιενεργό πηγή από τον απαριθμητή (ΣΧΗΜΑ 21.8a), οπότε οι παλμοί που θα καταγράφονται από αυτόν θα οφείλονται στην ραδιενέργεια του περιβάλλοντος.



ΣΧΗΜΑ 21.8

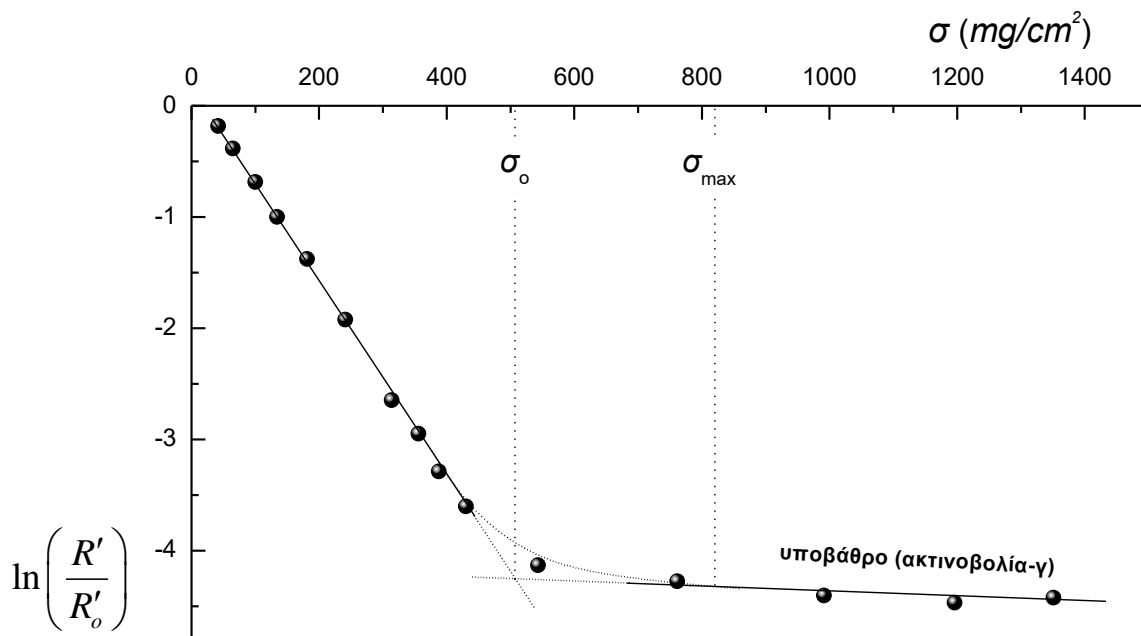
Κάτω από τις συνθήκες αυτές, η ΣΧΕΣΗ (21.12) να γραφεί εκ νέου αφού θα πρέπει η ραδιενέργεια περιβάλλοντος  $R_b$  να αφαιρεθεί από τις μετρούμενες τιμές  $R_o$  και  $R$ , οπότε:

$$R - R_b = (R_o - R_b) \cdot e^{-K_\beta \cdot \sigma} \Rightarrow R' = R'_o \cdot e^{-K_\beta \cdot \sigma}$$

$$\frac{R'}{R'_o} = e^{-K_\beta \cdot \sigma} \Rightarrow \ln \left( \frac{R'}{R'_o} \right) = \ln e^{-K_\beta \cdot \sigma} \Rightarrow$$

$$\boxed{\ln \left( \frac{R'}{R'_o} \right) = -K_\beta \cdot \sigma} \quad (21.23)$$

Η ΣΧΕΣΗ (21.23) είναι της μορφής  $y = kx$  (εξίσωση ευθείας) οπότε αναμένεται πειραματικά ότι για σχετικά μικρές τιμές της επιφανειακής πυκνότητας  $\sigma$  η γραφική παράσταση  $\ln(R'/R'_o) = f(\sigma)$  να είναι γραμμική, όπου η κλίση δηλαδή θα είναι σταθερή και ίση με τον συντελεστή  $-K_\beta$ .



ΣΧΗΜΑ 21.9

Παρατηρούμε επίσης, ότι για μεγαλύτερες τιμές της παραμέτρου  $\sigma$  (παχύτερο στρώμα απορροφητή) και μέχρι την τιμή  $\sigma = \sigma_{\text{max}}$  η συνάρτηση που εκφράζεται με τη ΣΧΕΣΗ (21.23) γίνεται βαθμιαία μη γραμμική. Τέλος, για τιμές της επιφανειακής πυκνότητας  $\sigma > \sigma_{\text{max}}$  η μελετούμενη συνάρτηση παραμένει σταθερή (ΣΧΗΜΑ 21.9). Η οριακή τιμή  $\sigma_{\text{max}}$  της επιφανειακής πυκνότητας  $\sigma$  δίνει τη μέγιστη εμβέλεια των σωματιδίων  $\beta$  μέσα στην ύλη. Η ραδιενέργεια που καταμετρά η απარიθμητική διάταξη όταν  $\sigma > \sigma_{\text{max}}$  οφείλεται κυρίως στην ακτινοβολία  $\gamma$  η οποία εκπέμπεται ταυτόχρονα με τα σωματίδια  $\beta$  από τη ραδιενεργό πηγή.

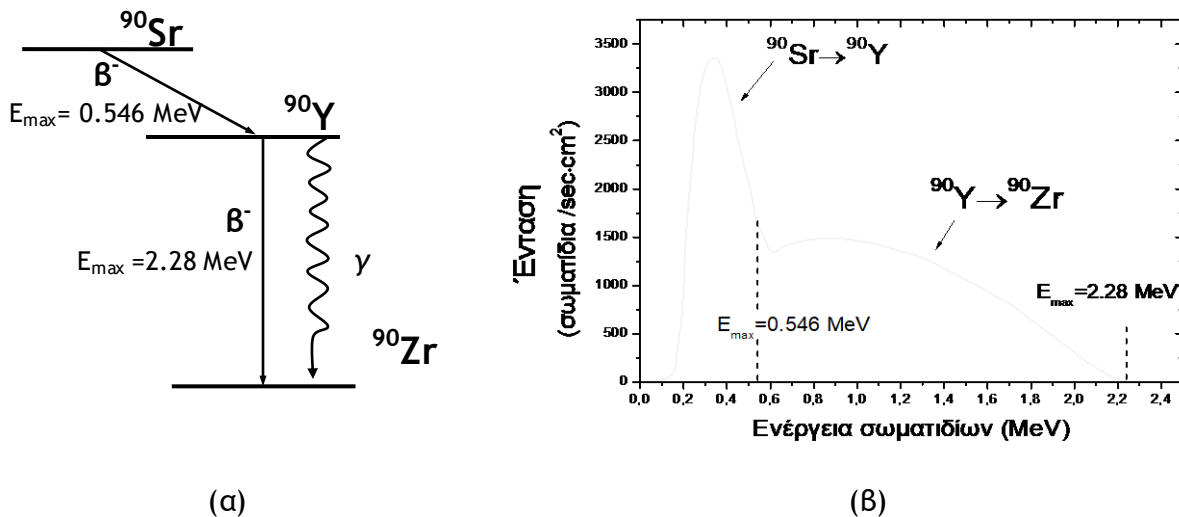
### Προσδιορισμός μέσης εμβέλειας $\sigma_0$ και μέγιστης εμβέλειας $\sigma_{max}$ σωματιδίων $\beta$

Για να προσδιορίσουμε την *πραγματική μέση εμβέλεια*  $\sigma_0$  των σωματιδίων  $\beta$  μέσα στο απορροφητικό υλικό εργαζόμαστε ως εξής: χαράζουμε την ασυμπτωτική ευθεία η οποία αντιστοιχεί στο γραμμικό τμήμα της ΣΧΕΣΗΣ (21.23) καθώς και την ασυμπτωτική ευθεία στο τμήμα της μελετούμενης γραφικής παράστασης το οποίο αντιστοιχεί στο υπόβαθρο και κυρίως στην ακτινοβολία  $\gamma$  ( $\sigma > \sigma_{max}$ ). Η τιμή της επιφανειακής πυκνότητας η οποία αντιστοιχεί στο σημείο τομής των ασυμπτωτικών ευθειών ισούται με την τιμή  $\sigma_0$  της *πραγματικής μέσης εμβέλειας* των σωματιδίων  $\beta$  μέσα στην ύλη (δες ΣΧΗΜΑ 21.9).

Για να προσδιορίσουμε τη *μέγιστη εμβέλεια*  $\sigma_{max}$  εργαζόμαστε ως εξής: φέρνουμε καμπύλη που συνδέει ομαλά τις δύο γραμμικές περιοχές (μικρών παχών  $\sigma$  και υποβάθρου). Το σημείο τομής της καμπύλης με την ευθεία του υποβάθρου, αντιστοιχεί στη μέγιστη εμβέλεια  $\sigma_{max}$ . Μετά τον προσδιορισμό της παραμέτρου  $\sigma_{max}$ , η μέγιστη ενέργεια  $E_{max}$  των σωματιδίων  $\beta$  θα προκύψει από τη σχέση *εμβέλειας-ενέργειας* του Feather, (δες ΣΧΕΣΗ 21.14).

### Χαρακτηριστικά ραδιενεργούς πηγής $^{90}\text{Sr}$

Στο εργαστήριο θα χρησιμοποιηθεί ως πηγή σωματιδίων  $\beta^-$  το ραδιενεργό Στρόντιο  $^{90}\text{Sr}$ . Το διάγραμμα διάσπασης δίνεται στο Σχ.21.10(a) όπου οι πυρήνες Sr μετά τη διάσπαση τους μεταστοιχειώνονται σε πυρήνες Υτίου  $^{90}\text{Y}$  με ταυτόχρονη εκπομπή σωματιδίων  $\beta^-$  και ακτινοβολίας  $\gamma$  η οποία συνεισφέρει στην ραδιενέργεια υποβάθρου. Οι πυρήνες  $^{90}\text{Y}$  με τη σειρά τους διασπώνται ξανά με εκπομπή  $\beta^-$  σωματιδίων και μεταστοιχειώνονται στο σταθερό πλέον Ζιρκόνιο  $^{90}\text{Zr}$ . Οι μέγιστες ενέργειες  $E_{max}$  των σωματιδίων κατά τις διασπάσεις αυτές είναι 0.546 MeV και 2.28 MeV αντίστοιχα. Έτσι λοιπόν η πηγή  $^{90}\text{Sr}$  αποτελεί *διπλή πηγή* σωματιδίων  $\beta$ .



Σχήμα 21.10

Το ενεργειακό φάσμα των σωματιδίων  $\beta^-$  είναι η συνάρτηση της έντασης (ρυθμός καταγραφής σωματιδίων/επιφάνεια) με την ενέργεια. Είναι συνεχές, δηλαδή εκπέμπονται ηλεκτρόνια ( $\beta^-$ ) που μπορούν να έχουν ενέργεια μέσα σε ένα εύρος τιμών από μια ελάχιστη ως μια μέγιστη  $E_{max}$ . Παρατηρείστε στο Σχ.21.10(b) ότι το φάσμα αυτό έχει τα χαρακτηριστικά **δύο** πηγών αφού όπως είδαμε στο Σχ.21.10(a) **συνυπάρχουν** δύο διασπάσεις: Sr $\rightarrow$ Y και Y $\rightarrow$ Zr. Η μέγιστη ενέργεια λοιπόν που μπορεί να εκτιμηθεί πειραματικά, θα βρίσκεται στο διάστημα ( $0.546 < E_{max} < 2.28$  MeV) και οπωσδήποτε **δεν μπορεί** να ξεπερνά τα 2.28 MeV.