

ΑΣΚΗΣΗ 8

Δοσιμετρία γ-ακτινοβολίας. Στοιχεία ακτινοπροστασίας

(Λ. Σακελλίου, Α. Μουτσάτσος και Λ. Πετροκόκκινος, Νοέμβριος 2011)

I. ΣΚΟΠΟΣ

Εξοικείωση με τα δοσιμετρικά μεγέθη και μονάδες που χρησιμοποιούνται στη μελέτη της αλληλεπίδρασης ιονίζουσας ακτινοβολίας-ύλης. Στοιχεία ακτινοπροστασίας.

II. ΘΕΩΡΙΑ

IIα. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ

Ακτινοβολίες πάντα υπήρχαν στο περιβάλλον. Έρχονται από το διάστημα, τον Ήλιο και τα άλλα αστέρια, εκπέμπονται από τα ραδιενεργά στοιχεία που υπάρχουν στο έδαφος, ακόμη και στο ίδιο μας το σώμα. Ακτινοβολία είναι το φως που βλέπουμε, ακτινοβολία (που δεν την βλέπουμε) εκπέμπει η θερμάστρα και μας ζεσταίνει, ακτινοβολία περνάει από το σώμα μας (ακτίνες-γ) όταν κάνουμε ακτινογραφία, ακτινοβολία εκπέμπει το κινητό τηλέφωνο. Οι ακτινοβολίες αυτές διαφέρουν ως προς την ενέργεια που έχουν, κι ανάλογα με την ενέργεια τους είναι και η δράση τους, η αλληλεπίδρασή τους με το περιβάλλον και τον άνθρωπο.

Ιονίζουσες ακτινοβολίες (ionizing radiation) λέμε τις ακτινοβολίες εκείνες που έχουν αρκετά μεγάλη ενέργεια, ώστε να μπορούν να ιονίσουν την ύλη. Μη-ιονίζουσες ακτινοβολίες (non-ionizing radiation) είναι οι ακτινοβολίες, όπως το ορατό φως και τα μικροκύματα, που δεν έχουν αρκετή ενέργεια να ιονίσουν την ύλη. Οι ιονίζουσες ακτινοβολίες μπορεί να είναι ηλεκτρομαγνητικής φύσεως (φωτόνια), αλλά και σωματιδιακής όπως τα σωματίδια α και β που εκπέμπονται όταν ένας ραδιενεργός πυρήνας διασπαστεί ή και νετρόνια που παράγονται σε μεγάλους αριθμούς στους πυρηνικούς αντιδραστήρες καθώς και κατά την έκρηξη πυρηνικών όπλων.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα τυπικό παράδειγμα που δείχνει τις ιονίζουσες ακτινοβολίες που υπάρχουν στο περιβάλλον που ζούμε. Οι ακτινοβολίες αυτές είναι

φυσικής προέλευσης και πρακτικά ήταν οι ίδιες σ' όλη τη διάρκεια της εξέλιξη της ζωής (και του ανθρώπου) στον πλανήτη μας.

Περίπου 100.000 κοσμικά νετρόνια και άλλα 400.000 δευτερογενή σωματίδια περνάνε από το σώμα μας κάθε ώρα.

Περίπου 30.000 ραδιενεργά άτομα διασπώνται κάθε ώρα στους πνεύμονές μας

Περίπου 15.000.000 ραδιενεργά άτομα καλίου-40 και 7.000 ουρανίου διασπώνται κάθε ώρα στο σώμα μας.

Περισσότερες από 200.000.000 ακτίνες-γ περνάνε από το σώμα μας κάθε ώρα

Η βιολογική δράση των μη-ιονίζουσών ακτινοβολιών (ζεσταινόμαστε από τη θερμάστρα, μαυρίζουμε στον ήλιο...) ερμηνεύεται από την απόθεση-απορρόφηση μεγάλης ποσότητας ενέργειας από τον οργανισμό μας. Αντίθετα η βιολογική δράση των ιονίζουσών ακτινοβολιών δεν μπορεί να ερμηνευτεί με τον ίδιο τρόπο, όπως θα δούμε στη συνέχεια. Προηγούμενα όμως θα αναφέρουμε συνοπτικά πως παράγονται οι ιονίζουσες ακτινοβολίες και πως αλληλεπιδρούν με την ύλη.

Πβ. ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ

Ραδιενέργεια είναι η ιδιότητα που έχουν οι πυρήνες μερικών ισοτόπων, να διασπώνται αυθόρμητα. Τα ισότοπα είναι άτομα του ίδιου χημικού στοιχείου που διαφέρουν στην ατομική μάζα τους, ενώ δηλαδή έχουν τον ίδιο αριθμό πρωτονίων στον πυρήνα τους (και επομένως τον ίδιο αριθμό ηλεκτρονίων και άρα έχουν τις ίδιες χημικές ιδιότητες) διαφέρουν στον αριθμό νετρονίων. Μερικά ισότοπα είναι σταθερά, αλλά τα περισσότερα είναι ασταθή-ραδιενεργά. Τα ραδιο-ισότοπα (radioisotopes) χρησιμοποιούνται ευρύτατα σήμερα σε ιατρικές εφαρμογές και γενικότερα στη τεχνολογία. Ραδιενέργεια (radioactivity) είναι η αυθόρμητη μεταστοιχείωση ενός ασταθούς ισοτόπου και ακολουθείται από εκπομπή ακτινοβολίας.

Ραδιενέργεια \Rightarrow αυθόρμητη μεταστοιχείωση \Rightarrow εκπομπή ακτινοβολίας

Στη φύση υπάρχουν περί τα 70 **φυσικά** ραδιενεργά ισότοπα, (όπως ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K), ενώ υπάρχουν και περισσότερα από 3000 **τεχνητά** ραδιενεργά ισότοπα (όπως ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{131}I). Τα φυσικά είναι εκείνα που επέζησαν μέχρι σήμερα από τότε που δημιουργήθηκε η Γη. Τα τεχνητά παρασκευάστηκαν τον 20^ο αιώνα! Τα ραδιενεργά ισότοπα δεν είναι σταθερά. Η πιθανότητα που έχει κάθε ραδιενεργό ισότοπο να διασπαστεί είναι συγκεκριμένη και σταθερή (σταθερά διάσπασης) όπως

επίσης συγκεκριμένος είναι και ο τρόπος που θα διασπαστεί καθώς και η ακτινοβολία (είδος και ενέργεια) που θα εκπεμφθεί.

Ορίζουμε σαν **ενεργότητα ή ραδιενέργεια (activity)** την ποσότητα ενός ραδιενεργού υλικού σε δεδομένη χρονική στιγμή και την μετράμε με τον αριθμό των ραδιενεργών διασπάσεων στη μονάδα του χρόνου. Σαν μονάδα μέτρησης της ενεργότητας, σήμερα, έχουμε τη μία διάσπαση το δευτερόλεπτο, που τιμητικά ονομάστηκε Becquerel (Henri Becquerel, 1852-1908):

$$1 \text{ becquerel (Bq)} = 1 \text{ διάσπαση / s}$$

Παλαιότερα, πάλι τιμητικά (Maria Sklodowska-Curie, 1867–1934), χρησιμοποιούσαμε τη μονάδα Curie (Ci): $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$

Η ενεργότητα C μπορεί να υπολογιστεί αν γνωρίζουμε τον αριθμό N των ραδιενεργών πυρήνων σε δεδομένη χρονική στιγμή, από τη σχέση:

$$\text{Ενεργότητα: } C = \lambda N = -dN/dt \quad (9-1)$$

όπου λ είναι η σταθερά διάσπασης, η οποία εκφράζει την πιθανότητα που έχει ένα ραδιενεργό ισότοπο να διασπαστεί στη μονάδα του χρόνου (επομένως μετράται σε s^{-1}). Η σταθερά διάσπασης λ είναι στοιχείο ταυτότητας για κάθε ραδιενεργό ισότοπο. Ένα άλλο χρήσιμο μέγεθος, είναι ο **χρόνος υποδιπλασιασμού $T_{1/2}$** , δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται ώστε να διασπαστεί ο μισός αριθμός των αρχικών ραδιενεργών πυρήνων ή ισοδύναμα η ενεργότητα του δείγματος να πέσει στο μισό:

$$\text{Χρόνος υποδιπλασιασμού: } T_{1/2} = \ln 2 / \lambda \quad (9-2)$$

Ο αριθμός N των ραδιενεργών πυρήνων καθώς και η ενεργότητα C μειώνονται εκθετικά με τον χρόνο:

$$N = N_0 \exp(-\lambda t) \quad \text{και} \quad C = C_0 \exp(-\lambda t) \quad (9-3)$$

Παράδειγμα 1: Το Ci παλαιότερα ορίζονταν σαν η ραδιενέργεια 1g καθαρού ^{226}Ra . Αν ο χρόνος υποδιπλασιασμού του ^{226}Ra είναι $T_{1/2} = 1600 \text{ χρόνια} = 5,11 \cdot 10^{10} \text{ s}$, να γίνει έλεγχος της αντιστοιχίας $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$.

Το γραμμοάτομο του ^{226}Ra περιέχει N_A άτομα και η μάζα του είναι προσεγγιστικά ίση με 226g. Κατά συνέπεια το 1g ^{226}Ra περιέχει $N_A/226$ άτομα και επομένως $N_A/226$ πυρήνες. Η ραδιενέργεια, C, ορίζεται σαν το γινόμενο λN , όπου λ η σταθερά διάσπασης και N ο αριθμός των πυρήνων. Άρα:

$$C = \lambda N = \frac{N \ln 2}{T_{1/2}} = \frac{N_A \ln 2}{226 T_{1/2}} \approx 3,7 \cdot 10^{10} \text{ διασπάσεις/s}$$

Το είδος και η ενέργεια της ακτινοβολίας που εκπέμπεται στις ραδιενεργές διασπάσεις είναι συγκεκριμένα (στοιχείο ταυτότητας) για κάθε ραδιενεργό ισότοπο. Οι ακτινοβολίες είναι εκείνες που ανιχνεύονται και καταμετρούνται.

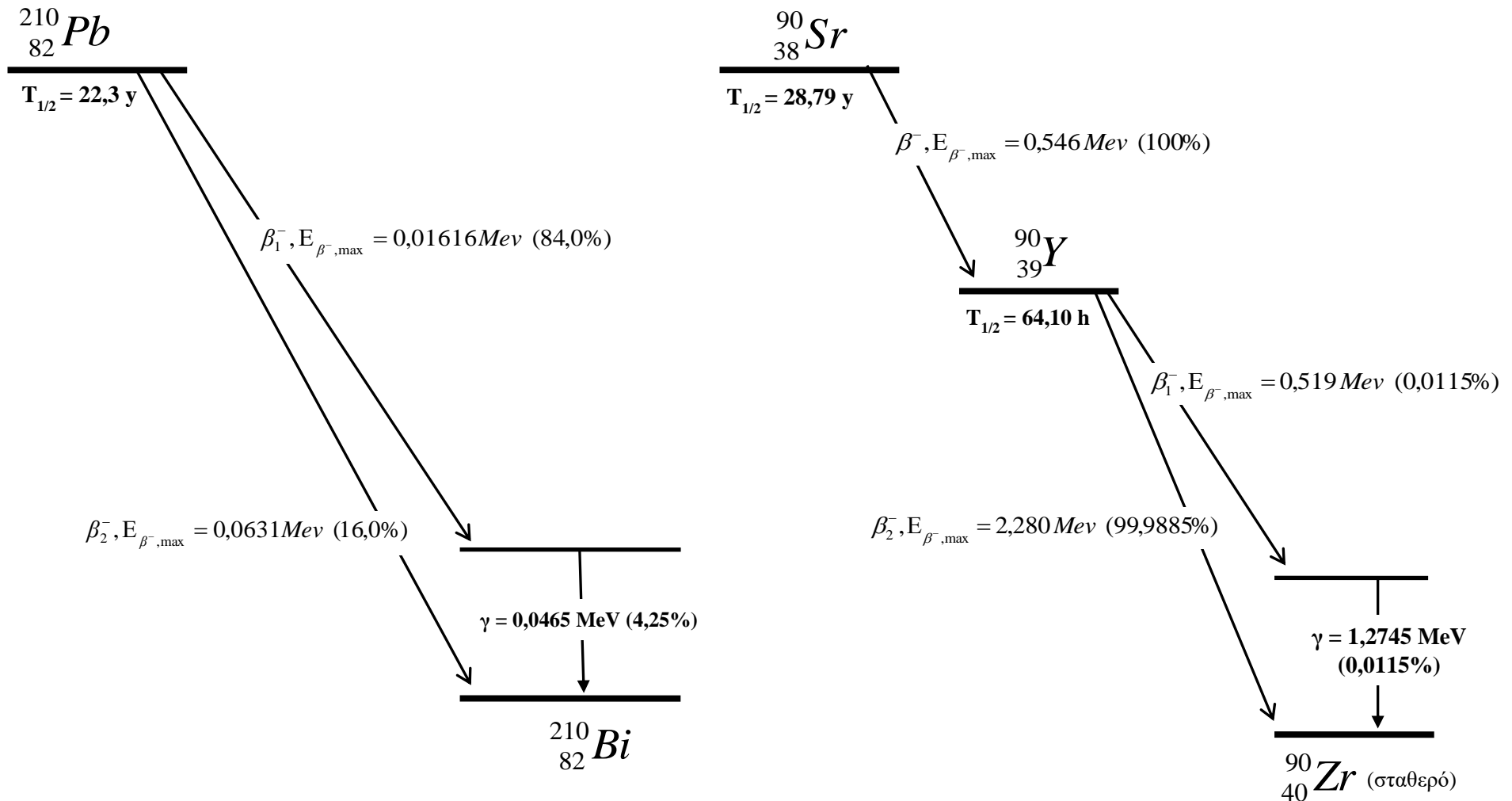
Οι ραδιενεργές πηγές που θα χρησιμοποιηθούν στο εργαστήριο είναι το ^{90}Sr και ο ^{210}Pb (θα χρησιμοποιηθούν σαν πηγές β-ακτινοβολίας) καθώς και το ^{60}Co , το ^{137}Cs και το ^{22}Na (θα χρησιμοποιηθούν σαν πηγές γ-ακτινοβολίας). Σε κάθε πηγή είναι σημειωμένος ο χρόνος t_0 κατασκευής της και η αρχική ενεργότητα C_0 . Ο υπολογισμός της ενεργότητας την ώρα της άσκησης θα γίνεται με βάση τη σχέση 9-3. Τα διαγράμματα διάσπασης των πηγών δίνονται στα σχήματα 9-1 και 9-2.

Το ^{90}Sr με β⁻ διάσπαση και πιθανότητα 100% καταλήγει στη βασική στάθμη του ^{90}Y (σχήμα 9-1), εκπέμποντας ένα σωματίο-β με μέγιστη ενέργεια 0,546 MeV. Ο θυγατρικός πυρήνας ^{90}Y , δεν είναι σταθερός αλλά ραδιενεργός και με τη σειρά του διασπάται στον σταθερό πυρήνα ^{90}Zr , εκπέμποντας ένα σωματίο-β με μέγιστη ενέργεια 2,280 MeV και πιθανότητα 99,988% ή εκπέμποντας ένα σωματίο-β με μέγιστη ενέργεια 0,519 MeV και πιθανότητα 0,0115%. Ο νέος θυγατρικός πυρήνας ^{90}Zr επομένως, σχηματίζεται στην πρώτη του διεγερμένη με πολύ μικρή πιθανότητα (0,0115%). Η αποδιέγερση του θυγατρικού πυρήνα ^{90}Zr στην βασική του κατάσταση, γίνεται με εκπομπή γ-ακτινοβολίας με ενέργεια $E_\gamma=1,12745$ MeV και πιθανότητα 0,0115%. Επομένως θα πρέπει να υπολογίζουμε ότι εκπέμπεται κατά μέσο όρο 1 φωτόνιο σε κάθε ~10000 διασπάσεις του ^{90}Sr (ουσιαστικά το ^{90}Sr είναι καθαρή πηγή β-ακτινοβολίας). Για να υπολογίσουμε τα σωματίια-β που εκπέμπονται από πηγή ^{90}Sr , θα πρέπει να συμπεριλάβουμε και εκείνα που προέρχονται από το ^{90}Y . Αν μια πηγή κατασκευάστηκε αρχικά από καθαρό ^{90}Sr και αρχική ενεργότητα C_0 (αυτή είναι η τιμή που αναγράφεται σε κάθε πηγή) η ενεργότητά της C θα πέφτει εκθετικά με τον χρόνο t :

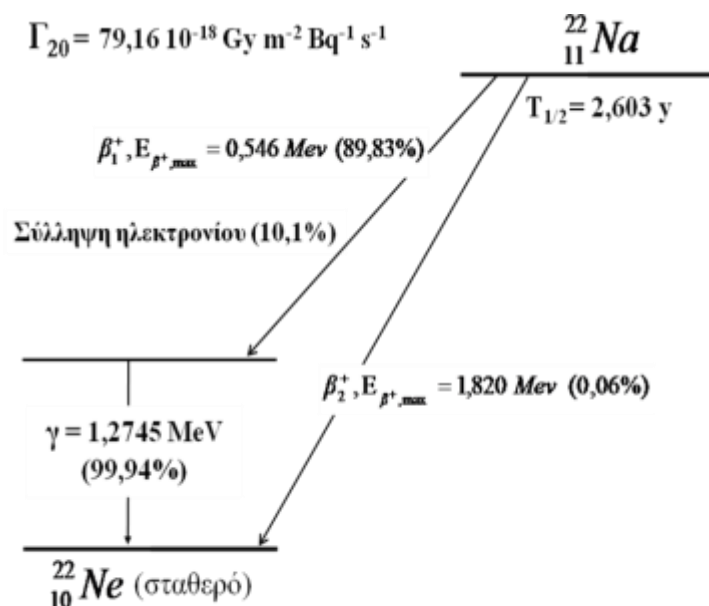
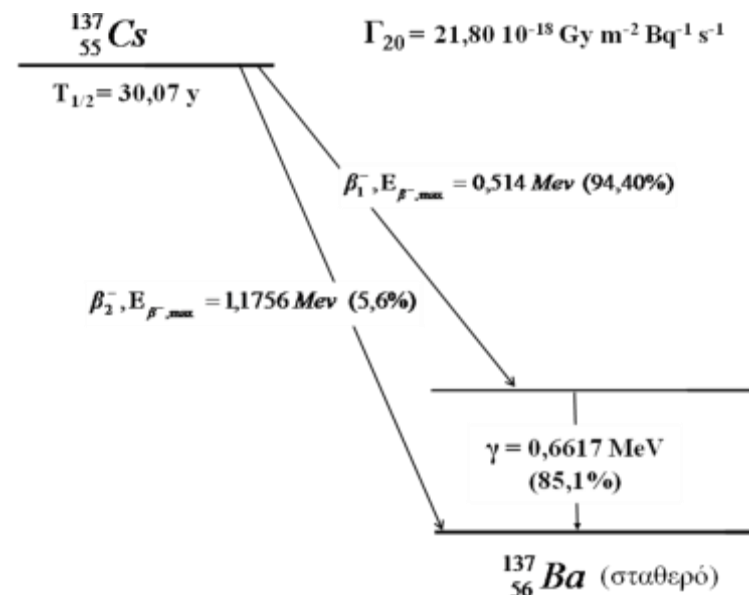
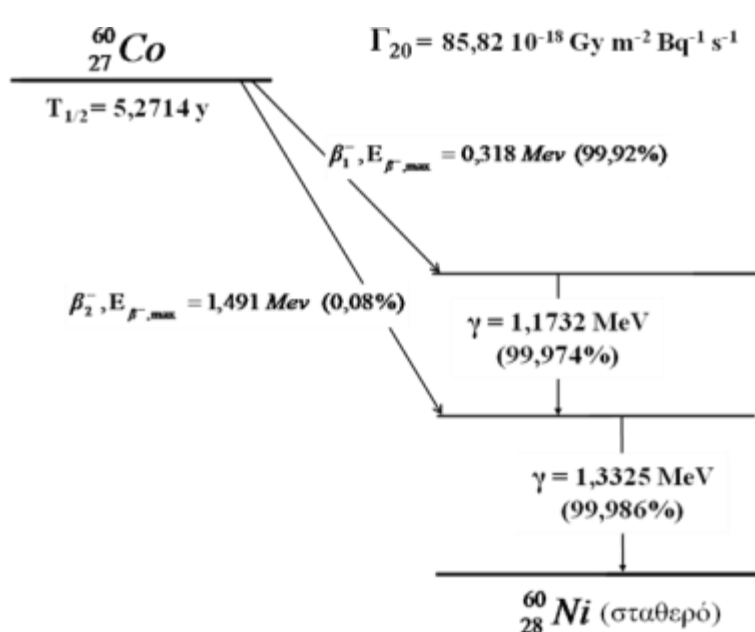
$$C = C_0 \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t\right) \quad (9-4)$$

Το ^{90}Y όμως που αρχικά δεν υπήρχε θα αρχίσει σταδιακά να σχηματίζεται με ρυθμό ίσο με το ρυθμό διάσπασης του ^{90}Sr , αλλά παράλληλα και να διασπάται με ρυθμό που καθορίζεται από τον χρόνο υποδιπλασιασμού του και την εκάστοτε ποσότητα

που έχει σχηματιστεί. Παρατηρούμε ότι ο χρόνος υποδιπλασιασμού $T_{1/2}=64,14$ ώρες του ^{90}Y είναι πολύ μικρότερος από τον χρόνο υποδιπλασιασμού $T_{1/2}=28,79$ χρόνια



Σχήμα 9-1. Διαγράμματα διάσπασης για τις πηγές β ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται στο εργαστήριο Πυρηνικής Φυσικής. Οι % πιθανότητες που δίνονται για τις δυνατές διασπάσεις/μεταπτώσεις είναι κανονικοποιημένες ανά διάσπαση του μητρικού πυρήνα.



Σχήμα 9-2. Διαγράμματα διάσπασης για τις πηγές γ-ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται στο εργαστήριο Πυρηνικής Φυσικής. Οι % πιθανότητες που δίνονται για κάθε δυνατή διάσπαση/μετάπτωση είναι κανονικοποιημένες ανά διάσπαση του μητρικού πυρήνα. Για κάθε ραδιενεργό ισότοπο δίνεται και η σταθερά ρυθμού KERMA (Γ_{20}) για φωτόνια ενέργειας άνω των 20 KeV (φωτόνια μικρότερης ενέργειας πρακτικά απορροφούνται από το περίβλημα της πηγής).

[Από την εξαϋλώση του β^+ παράγεται γ ακτινοβολία: $\gamma_{\alpha\beta} = 0,511 \text{ MeV} (179,8\%)$]

του ^{90}Sr . Στις περιπτώσεις αυτές αποδεικνύεται ότι επέρχεται σχετικά γρήγορα (για το ^{90}Sr αυτό επιτυγχάνεται σε ~ 20 ημέρες) ραδιενεργή ισορροπία σύμφωνα με την οποία η ενεργότητα του ^{90}Y είναι κάθε στιγμή ίση με την ενεργότητα του ^{90}Sr . Επομένως η συνολική ενεργότητα της πηγής θα είναι πάντα διπλάσια από εκείνη που υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (9-4), δηλ. $2C$. Επομένως ή θα χρησιμοποιούμε την ενεργότητα C και σε κάθε διάσπαση θα θεωρούμε ότι εκπέμπονται δύο (σχεδόν) σωμάτια-β ή ισοδύναμα θα χρησιμοποιούμε την ενεργότητα $2C$ και σε κάθε διάσπαση θα θεωρούμε ότι εκπέμπεται ένα (σχεδόν) σωμάτιο-β.

Στην περίπτωση του ^{210}Pb (σχήμα 9-1) θεωρούμε ότι σε κάθε διάσπαση εκπέμπονται κατά μέσο όρο $0,0425$ ακτίνες-γ και 1 σωμάτιο-β.

Το ^{137}Cs διασπάται εκπέμποντας β-ακτινοβολία (σχήμα 9-2). Με πιθανότητα $5,6\%$ καταλήγει στη βασική στάθμη του ^{137}Ba εκπέμποντας ένα σωμάτιο-β με μέγιστη ενέργεια $1,1756$ MeV και την υπόλοιπη πιθανότητα $94,4\%$ να οδηγεί στην πρώτη διεγερμένη κατάσταση του ^{137}Ba , εκπέμποντας ένα σωμάτιο-β με μέγιστη ενέργεια $0,514$ MeV. Η αποδιέγερση του θυγατρικού πυρήνα ^{137}Ba στην βασική του κατάσταση, γίνεται με εκπομπή γ-ακτινοβολίας με ενέργεια $E_\gamma=0,6617$ MeV. Όπως παρατηρούμε όμως στο διάγραμμα διάσπασης, ενώ η διεγερμένη κατάσταση σχηματίζεται στο $94,4\%$ των β-διασπάσεων, η γ-ακτινοβολία παράγεται μόνο με πιθανότητα $85,1\%$ (το υπόλοιπο ποσοστό αντιστοιχεί σε αποδιέγερση μέσω ηλεκτρονίου εσωτερικής μετατροπής). Επομένως σε κάθε διάσπαση του ^{137}Cs , θα πρέπει να υπολογίζουμε ότι εκπέμπονται κατά μέσο όρο $0,851$ φωτόνια και όχι 1 .

Το ^{60}Co διασπάται εκπέμποντας β-ακτινοβολία. Από το διάγραμμα διάσπασης του παρατηρούμε ότι σε κάθε διάσπαση του ^{60}Co παράγονται (σχεδόν) δύο φωτόνια, το ένα με ενέργεια $1,1732$ MeV και το άλλο με ενέργεια $1,3325$ MeV.

Το ^{22}Na , μεταστοιχείωνεται στην πρώτη διεγερμένη κατάσταση του ^{22}Ne είτε με β^+ διάσπαση (πιθανότητα $\sim 90\%$) είτε με σύλληψη ηλεκτρονίου (πιθανότητα $\sim 10\%$). Επομένως εκπέμπεται σχεδόν ένα φωτόνιο ανά διάσπαση με ενέργεια $1,820$ MeV. Το β^+ όμως που παράγεται θα εξαϋλωθεί σε δύο φωτόνια που το καθένα θα έχει ενέργεια ίση με την ενέργεια ηρεμίας του ηλεκτρονίου, δηλ. $0,512$ MeV. Άρα σε κάθε διάσπαση του ^{22}Na θα πρέπει να συνυπολογίζουμε την εκπομπή $\sim 2 \times 0,90 = 1,8$ φωτονίων με την χαρακτηριστική ενέργεια των $0,512$ MeV.

Τα ραδιοϊσότοπα ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{131}I κ.α. παράγονται στους πυρηνικούς αντιδραστήρες και στις δοκιμές των πυρηνικών όπλων, μολύνουν το περιβάλλον (ραδιενεργός επίπτωση) και είναι επικίνδυνα για τον άνθρωπο. Ο οργανισμός μας δεν ξεχωρίζει το

καίσιο (Cs) από το κάλιο ούτε το στρόντιο (Sr) απ' το ασβέστιο. Έτσι μεταβολίζει το μεν καίσιο στα κύτταρα, το δε στρόντιο στα οστά. Το ^{131}I , όπως και τα άλλα ισότοπα του ιωδίου συγκεντρώνεται στον θυρεοειδή μας και όταν διασπάται ακτινοβολεί τους γύρω ιστούς. Μάλιστα επειδή το ^{131}I έχει σχετικά μικρό χρόνο υποδιπλασιασμού (~8 μέρες) η ενεργότητά του θα είναι ανάλογα σχετικά μεγάλη (βλέπε σχέσεις **9-2, 9-3**), σε αντίθεση με το ^{137}Cs και το ^{90}Sr που έχουν πολύ μεγάλους χρόνους υποδιπλασιασμού (~30 χρόνια). Σε ένα πυρηνικό ατύχημα (π.χ. Chernobyl) τα άμεσα μέτρα ακτινοπροστασίας σχετίζονται με το ιώδιο (χορήγηση μη-ραδιενεργού ιωδίου σε χάπια ώστε να κορεστεί ο θυρεοειδής με σταθερό ιώδιο) ενώ τα προβλήματα με το στρόντιο και το καίσιο είναι πιο μακροπρόθεσμα.

Παράδειγμα ραδιενεργού επίπτωσης: 1g ^{131}I εναποτίθεται ομοιόμορφα στο Ελληνικό έδαφος (132000 km²). Υπολογίζεται ότι αυτό αντιστοιχεί σε 34848 Bq/m². Οι μετρήσεις μετά το ατύχημα του Chernobyl έδειξαν ότι η μέση εναπόθεση ^{131}I στη χώρα μας ήταν 25000 Bq/m². **ΟΥΤΕ 1 g ^{131}I !**

Πγ. ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ ΚΑΙ ΒΙΟΛΟΓΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Κρίσιμος στόχος: DNA

Κρίσιμη βλάβη: διπλή θραύση DNA

Κατά την αλληλεπίδραση ιονίζουσας ακτινοβολίας – βιολογικού συστήματος επέρχεται διέγερση και ιονισμός των βιολογικών μορίων (άμεση δράση) και σχηματίζονται δραστικές ελεύθερες ρίζες (από την υδρόλυση του νερού). Οι ρίζες αυτές αντιδρούν έντονα με το DNA (έμμεση δράση). Το αποτέλεσμα είναι χημικές αλλαγές σε κυτταρικό επίπεδο. Το πιθανό βιολογικό αποτέλεσμα (σωματική ή/και γενετική επιβάρυνση) είναι επακόλουθο της μη έγκαιρης και σωστής επιδιόρθωσης της βλάβης και εξαρτάται από την **ποσότητα** και την **ποιότητα** της ενέργειας της ακτινοβολίας που απορροφήθηκε.

Η δόση εκφράζει την ποσότητα της ενέργειας της ακτινοβολίας που απορροφήθηκε:

$\Delta\text{όση} = (\text{Ενέργεια που απορροφήθηκε από ακτινοβολία}) / (\text{μονάδα μάζας})$

Στο σύστημα μονάδων SI η δόση μετριέται σε Gy. Παλαιότερα ήταν σε χρήση το rad, όπου: **1Gy =1 J/kg =100 rad** (=6,24x10¹² MeV/kg ≈ 0,24 cal/kg)

Η ισοδύναμη δόση εκφράζει το συνδυασμένο αποτέλεσμα της ποσότητας (δόση) και της ποιότητας (παράγοντας ποιότητας Q) της ακτινοβολίας:

$$\text{Ισοδύναμη Δόση} = \text{Δόση} \times Q$$

Στο σύστημα μονάδων SI η ισοδύναμη δόση μετριέται σε Sv (Sievert). Παλαιότερα ήταν σε χρήση το rem, όπου $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem} = 1 \text{ Gy} \cdot Q$.

Ο παράγοντας Q εκφράζει την ποιότητα της ακτινοβολίας και παίρνει τις τιμές $Q=1$ (για φωτόνια και ηλεκτρόνια σε όλες τις ενέργειες), $Q=20$ (για τα σωματία- α) και $Q=5-20$ (για τα νετρόνια).

Το πιθανό βιολογικό αποτέλεσμα εξαρτάται από την ισοδύναμη δόση. Αυτό σημαίνει για παράδειγμα πως για δόση 1 Gy από φωτόνια ή σωματία- α , η επιβάρυνση από τα σωματία- α θα είναι πολύ μεγαλύτερη (αυτό συνδέεται με την πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα ιονισμών κατά μήκος της πολύ μικρής τροχιάς των σωματίων- α , και επομένως της αυξημένης πιθανότητας για διπλή θραύση της αλυσίδας του DNA). Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η ισοδύναμη δόση θα είναι 1 Sv από τα φωτόνια και 20 Sv από τα σωματία- α .

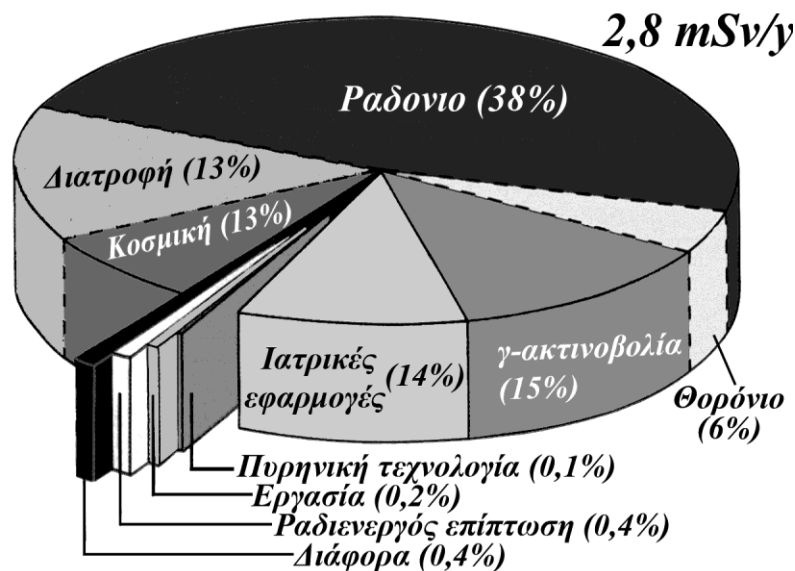
Τα βιολογικά αποτελέσματα της ακτινοβολίας χωρίζονται σε **στοχαστικά** και **μη-στοχαστικά**. Τα **μη-στοχαστικά** (τριχόπτωση, καταρράκτης οφθαλμών, στείρωση, ακόμη και θάνατος) είναι τα άμεσα αποτελέσματα της ακτινοβολίας, παρουσιάζονται όταν η δόση υπερβεί κάποιο κατώφλι, και με την αύξηση της δόσης γίνονται σφοδρότερα.

Παράδειγμα θανατηφόρου δόσης: Ολόσωμη ακτινοβόληση με 5 Gy στα θηλαστικά είναι πολύ πιθανό να οδηγήσει στον θάνατο. Και όμως η συνολική ποσότητα της ενέργειας που απορροφήθηκε από το σώμα είναι μόλις $5 \text{ Gy} \times (\sim 70 \text{ Kg}) = 359 \text{ Joule} = \mathbf{84 \text{ cal}}$ (να συγκριθεί με την ενέργεια 120 kcal που παίρνουμε τρώγοντας ένα σοκολατάκι!). Η ελάχιστη αυτή ποσότητα ενέργειας (84 cal) που αν απορροφηθεί από ιονίζουσα ακτινοβολία είναι θανατηφόρος για τον άνθρωπο, δεν φτάνει για να αυξηθεί η θερμοκρασία του ούτε κατά ένα χιλιοστό του $1 \text{ }^\circ\text{C}$. Θανατηφόρα για το κύτταρο απορρόφηση δόσης από **μη-ιονίζουσα** ακτινοβολία θα πρέπει να είναι δεκάδες φορές μεγαλύτερη ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία περισσότερο από $44 \text{ }^\circ\text{C}$.

Τα *στοχαστικά* αποτελέσματα της ακτινοβολίας (καρκινογένεση, γενετική επιβάρυνση) είναι απώτερα, ΔΕΝ παρουσιάζουν κατώφλι, και με την αύξηση της δόσης αυξάνει η πιθανότητα εμφάνισης της βλάβης.

Καμιά δόση οσοδήποτε μικρή δεν θεωρείται ασφαλής

Αυτό βέβαια δεν σημαίνει πως μπορούμε να μηδενίσουμε τη δόση που δεχόμαστε. Ο άνθρωπος κατά μέσο όρο δέχεται 2,8 mSv τον χρόνο. Στο σχήμα 9-3 παρουσιάζεται η συνεισφορά των διαφόρων πηγών ακτινοβολίας, φυσικής και τεχνητής προέλευσης στην *μέση ετήσια παγκόσμια* ισοδύναμη δόση, που ανέρχεται σε 2,8 mSv.



ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ 85%
ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΠΗΓΕΣ 15%

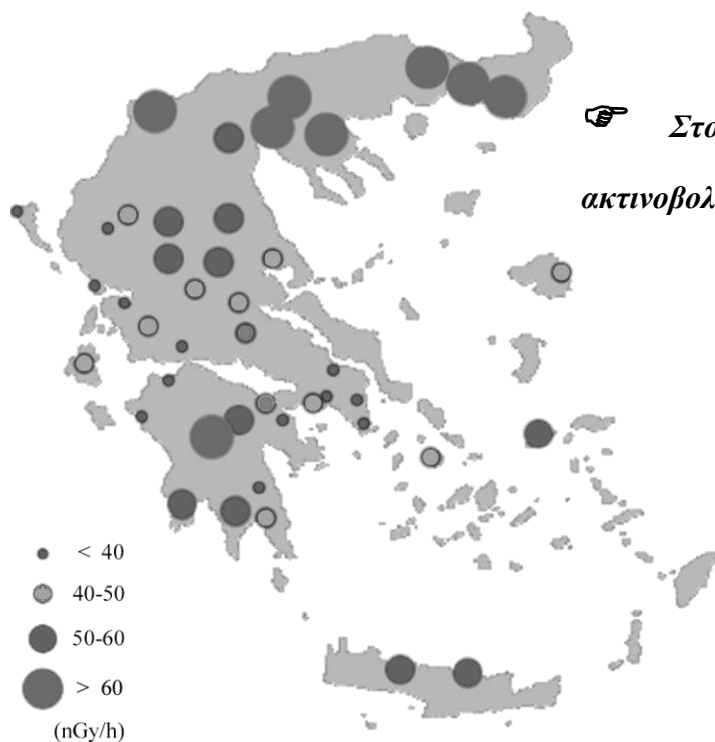
Σχήμα 9-3

Παρατηρούμε ότι το ~85% οφείλεται σε φυσικές πηγές ακτινοβολίας και το ~15% σε τεχνητές πηγές. Από τις τελευταίες το μεγαλύτερο μέρος αναφέρεται σε ιατρικές εφαρμογές. Θα πρέπει βέβαια να τονιστεί ότι το αντίστοιχο όφελος για την υγεία των ασθενών είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από την αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης κάποιας ακτινοπροκλητής βλάβης (στοχαστικής φύσεως). Στον πίνακα 9-1 παρουσιάζονται ενδεικτικά ολόσωμες ισοδύναμες δόσεις για τις συνηθέστερες ιατρικές διαγνωστικές εξετάσεις με χρήση ιονιζουσών ακτινοβολιών (κλασική ακτινογραφία, αξονική τομογραφία (CT), ποζιτρονική τομογραφία (PET)). Για κάθε εξέταση η δόση συγκρίνεται με μία τυπική ακτινογραφία θώρακος καθώς και με τη μέση δόση από την ακτινοβολία υποβάθρου.

Πίνακας 9-1

Εξέταση	Ολόσωμη ισοδύναμη δόση (mSv)	Ισοδύναμος αριθμός ακτινογραφιών θώρακος	Ισοδύναμη περίοδος ακτινοβολίας υποβάθρου
Α/φία θώρακος	0,02	1	3 ημέρες
Α/φία κοιλίας	1,0	50	6 μήνες
Αξονική εγκεφάλου	2,3	115	1 έτος
Αξονική θώρακος	8	400	3,6 έτη
Αξονική κοιλίας	10	500	4,5 έτη
Σπινθηρογράφημα θυρεοειδούς	1	50	6 μήνες
Ποζιτρονική Τομογραφία (PET)	5	250	2,3 έτη

Στο σχήμα 9-4 παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα που δείχνουν τα επίπεδα της ακτινοβολίας από οικοδομικά υλικά και κοσμική ακτινοβολία στο εσωτερικό κατοικιών στην χώρα μας. Παρατηρούμε σχετικά αυξημένες τιμές στη βόρεια Ελλάδα και πολύ μικρές τιμές στην Αττική (συγκριτικά με τις άλλες Ευρωπαϊκές χώρες, η χώρα μας έχει χαμηλότερες τιμές φυσικής ακτινοβολίας).



☞ Στο χώρο του εργαστηρίου τα επίπεδα ακτινοβολίας υποβάθρου είναι ~60 nGy/h

Σχήμα 9-4

II.δ. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Σκοπός της ακτινοπροστασίας είναι ο περιορισμός των στοχαστικών και η αποφυγή των μη-στοχαστικών αποτελεσμάτων της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με την έμβια ύλη. Σε διεθνές επίπεδο η εφαρμογή της ακτινοπροστασίας προς δημόσιο όφελος ελέγχεται και προωθείται από τη Διεθνή Επιτροπή Ακτινοπροστασίας (International Commission on Radiological Protection, ICRP, <http://www.icrp.org/>), ιδρυθείσα το 1928. Η ICRP εκδίδει οδηγίες προστασίας και συστάσεις βασιζόμενη στις θεμελιώδεις αρχές ακτινοπροστασίας από ιονίζουσες ακτινοβολίες. Σε εθνικό επίπεδο η αρμόδια αρχή για θέματα ακτινοπροστασίας γενικού πληθυσμού, εργαζομένων και περιβάλλοντος από τις ιονίζουσες ακτινοβολίες καθώς και για θέματα αντιμετώπισης πυρηνικών/ραδιολογικών ατυχημάτων είναι η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ, <http://www.eeae.gr/gr/>). Οι κανονισμοί ακτινοπροστασίας καθώς και οι διαδικασίες ελέγχου και αδειοδότησης της χρήσης πηγών ιονίζουσας ακτινοβολίας είναι κατά νόμο ευθύνη της ΕΕΑΕ ως επιστημονικού συμβούλου του Υπουργείου Ανάπτυξης. Ο ισχύων Κανονισμός Ακτινοπροστασίας έγινε βάσει της Υπουργικής Απόφασης 1014 (ΦΟΡ) 94, *Έγκριση Κανονισμών Ακτινοπροστασίας*, ΦΕΚ 216/6 Μαρτίου 2001, Τεύχος Δεύτερο.

Κανονισμός Ακτινοπροστασίας – Βασικές αρχές

Ο κανονισμός ακτινοπροστασίας περιλαμβάνει τις βασικές προϋποθέσεις και απαιτήσεις ακτινοπροστασίας για την άσκηση δραστηριοτήτων που εγκυμονούν κινδύνους από ιονίζουσες ακτινοβολίες καθώς και την προστασία του γενικού πληθυσμού. Οι γενικές αρχές πάνω στις οποίες βασίζεται ο Κανονισμός Ακτινοπροστασίας είναι:

α. Αρχή Αιτιολόγησης : κάθε πρακτική με ιονίζουσες ακτινοβολίες, πρέπει να κριθεί αιτιολογημένα βάσει των κοινωνικο-οικονομικών ή άλλων πλεονεκτημάτων που παρέχει σε σχέση με την βλάβη στην υγεία την οποία μπορεί να προκαλέσει. Οι μη αιτιολογημένες εκθέσεις απαγορεύονται.

β. Αρχή Βελτιστοποίησης : για κάθε αιτιολογημένη έκθεση σε ιονίζουσα ακτινοβολία, πρέπει να ακολουθείται πρακτική τέτοια ώστε η συνεπαγόμενη δόση, ο αριθμός των εκτιθέμενων ατόμων και η πιθανότητα να προκύψουν μη αναμενόμενες εκθέσεις, να διατηρούνται στα χαμηλότερα δυνατά επίπεδα όσο αυτό είναι λογικά εφικτό.

γ. Αρχή Ορίων Δόσεων: δεν επιτρέπεται υπέρβαση των θεσπισμένων ορίων δόσεων παρά μόνο σε ειδικές περιπτώσεις και αφού ληφθεί υπόψιν η Αρχή της Αιτιολόγησης. Η αρχή αυτή δεν ισχύει για τις ιατρικές εκθέσεις. Τα όρια αυτά δόσεων είναι:

- ✓ 20 mSv ανά έτος για τους επαγγελματικά εκτιθέμενους και 100 mSv για περίοδο πέντε συνεχόμενων ετών
- ✓ 1 mSv ανά έτος για άτομα του κοινού. Στο όριο αυτό δεν περιλαμβάνονται οι δόσεις που οφείλονται σε ιατρικές εφαρμογές και στη φυσική ακτινοβολία

Ειδικότερα για **μαθητευόμενους ή σπουδαστές** που εμπλέκονται σε χρήση ιονίζουσών ακτινοβολιών ο κανονισμός ακτινοπροστασίας προβλέπει:

- ✓ για άνω των 18 χρονών και σπουδές όπου είναι αναγκαία η χρήση ιονίζουσών ακτινοβολιών ή οδηγούν σε επάγγελμα που συνεπάγεται τη χρήση τους το όριο είναι ίδιο με αυτό των επαγγελματικά εκτιθέμενων
- ✓ από 16 έως 18 ετών το όριο είναι 6 mSv ανά έτος για μαθητευόμενους ή σπουδαστές όπως στην προηγούμενη κατηγορία
- ✓ για άνω των 16 ετών που δεν υπάγονται στις δύο προηγούμενες κατηγορίες το όριο δόσης είναι ίδιο με τα άτομα του κοινού

Γενικότερα, βασική αρχή της ακτινοπροστασίας είναι η αποφυγή κάθε περιττής έκθεσης σε ακτινοβολία και ο περιορισμός της δόσης όταν η έκθεση κρίνεται αναγκαία. Στην πράξη οι βασικές αρχές και κανόνες ακτινοπροστασίας μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα:

- ☞ Ελαχιστοποίηση του **χρόνου** έκθεσης στην ακτινοβολία
- ☞ Μεγιστοποίηση της **απόστασης** από την πηγή ακτινοβολίας
- ☞ Χρησιμοποίηση κατάλληλης **θωράκισης** μεταξύ του εκτιθέμενου και της πηγής ακτινοβολίας

Το εργαστήριο Πυρηνικής Φυσικής αποτελεί χώρο όπου χρησιμοποιούνται πηγές ακτινοβολίας (ραδιενεργά ισότοπα) και επομένως οι παραπάνω αρχές και κανονισμοί θα πρέπει να εφαρμόζονται. Η ισχύς των χρησιμοποιούμενων πηγών είναι αρκετά μικρή και η θωράκιση των χώρων φύλαξης των πηγών επαρκής ώστε συνολικά η έκθεση των

ασκούμενων φοιτητών να καθίσταται ελάχιστη και πάντως πολύ μικρότερη από περιοχές με υψηλά επίπεδα φυσικής ακτινοβολίας. Παρόλα αυτά η ορθή πρακτική χρήσης των πηγών είναι αναγκαία με βάση την αρχή της βελτιστοποίησης. Στα πλαίσια αυτά σε κάθε βήμα της άσκησης θα πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο η εκάστοτε απαραίτητη πηγή, η οποία μετά το πέρας της χρήσης της θα πρέπει να επιστρέφεται για φύλαξη. **Η άσκοπη χρήση πηγών είναι περιττή ακτινοβολήση.** Τέλος θα πρέπει να τονιστεί ότι σε καμία περίπτωση δεν θα πρέπει να αλλοιώνονται το περίβλημα και το κάλυμμα κάθε πηγής με κανένα τρόπο, οπότε και θα υπήρχε πιθανότητα απευθείας επαφής με το ραδιενεργό ισότοπο και πιθανή μεταφορά του στον οργανισμό, όπου θα ακτινοβολεί από μικρή απόσταση με μικρή ισχύ για πολύ ΜΕΓΑΛΟ χρονικό διάστημα. Οι ραδιενεργές πηγές του εργαστηρίου, αν και ακίνδυνες κατά τη χρήση τους στα πλαίσια άσκησης, ΔΕΝ ΕΙΝΑΙ ΠΑΙΧΝΙΔΙ. Τέλος καλό θα ήταν μετά το πέρας της άσκησης οι Φοιτητές να πλένουν τα χέρια τους, ώστε να μηδενιστεί η όποια πιθανότητα ραδιομόλυνσης.

Εγκυμοσύνη και ακτινοβολία

Η έκθεση σε ιονίζουσα ακτινοβολία εγκύων συνεπάγεται, εκτός των άλλων, πιθανούς κινδύνους και για το κύημα/έμβρυο. Η βιολογική επίδραση της ακτινοβολίας στο κύημα/έμβρυο (στοχαστικά και μη αποτελέσματα) πέρα από την απορροφούμενη δόση εξαρτάται και από τη φάση ανάπτυξής του κατά την ακτινοβολήση. Τα άμεσα αποτελέσματα (μη στοχαστικά) αφορούν σε εμφάνιση δυσπλασιών και νοητική καθυστέρηση στο παιδί ή διακοπή της κύησης. Η πιθανότητα εμφάνισης των απωτέρων αποτελεσμάτων (στοχαστικά τα οποία αφορούν κυρίως σε καρκινογένεσεις και λευχαιμία) αυξάνεται ανάλογα με τη δόση που δέχεται το έμβρυο και εκτιμάται περίπου σε 0,015% ανά 1 mSv.

Ανάλογα με τη φάση ανάπτυξης του κυήματος/εμβρύου οι επιδράσεις της ακτινοβολίας στο παιδί που θα γεννηθεί είναι:

- ✓ 1η φάση (1^η-2^η εβδομάδα): Θεωρείται ότι το παιδί που θα γεννηθεί δεν θα εμφανίσει βλάβες εξαιτίας της ακτινοβολήσης κατά την φάση αυτή, χωρίς ωστόσο οι στοχαστικοί κίνδυνοι (απώτερα αποτελέσματα) να μπορούν να αποκλεισθούν εντελώς. Η φάση αυτή θεωρείται χαμηλού κινδύνου.
- ✓ 2η φάση (3^η-8^η εβδομάδα): Κατά τη διάρκειά της και για δόσεις στο κύημα μεγαλύτερες των 100 mSv, υπάρχει πιθανότητα εμφάνισης δυσπλασίας.

- ✓ 3η φάση (8^η εβδομάδα - τοκετός): Το πρώτο διάστημα (8^η-15^η εβδομάδα) της φάσης αυτής, κατά το οποίο συντελείται η βασική διάπλαση του κεντρικού νευρικού συστήματος, έκθεση του εμβρύου σε υψηλές δόσεις (πάνω από 100 mSv) μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του δείκτη νοημοσύνης.

Η τιμή αυτή των 100 mSv είναι πολύ υψηλή και υποδηλώνει ότι οποιαδήποτε απεικονιστική τεχνική σε έγκυο είναι πλήρως τεκμηριωμένη (βλέπε π.χ. δόσεις συνηθέστερων ιατρικών διαγνωστικών εξετάσεων, πίνακας 9-1). Οι δόσεις που μπορεί να δεχτεί μία φοιτήτρια κατά την άσκησή της στο εργαστήριο Πυρηνικής Φυσικής είναι εκατοντάδες χιλιάδες φορές μικρότερη από την τιμή αυτή.

II.ε. ΜΕΓΕΘΗ ΚΑΙ ΜΟΝΑΔΕΣ ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑΣ

Σε κάθε πρόβλημα ακτινοπροστασίας το ζητούμενο είναι ο υπολογισμός της δόσης (δοσιμετρία) σε κάποιο σημείο ή περιοχή στο χώρο ή σε κάποιο ιστό ενδιαφέροντος εντός του πεδίου ακτινοβολίας· δόση από κάποια ιατρική εφαρμογή, δόση σε ασθενή σε ακτινοθεραπεία, δόση εργαζομένου κατά την εργασία του σε ακτινοδιαγνωστική μονάδα, δόση από ραδιομόλυνση ή ακτινολογικό ατύχημα, δόση σε φοιτήτη κατά την άσκησή του με ραδιενεργές πηγές. Η δόση όπως έχει ήδη αναφερθεί αφορά στην εναπόθεση ενέργειας από ακτινοβολία ανά μονάδα μάζας. Για να υπολογιστεί η εναποτιθέμενη ενέργεια από κάποιο πεδίο ακτινοβολίας είναι απαραίτητη η γνώση των χαρακτηριστικών του.

Στην άσκηση αυτή θα περιοριστούμε στη μελέτη πεδίων γ-ακτινοβολίας από ραδιενεργά ισότοπα. Οι διαστάσεις των πηγών ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται στο εργαστήριο Πυρηνικής Φυσικής είναι της τάξης του 1 mm, επομένως για αποστάσεις πολύ μεγαλύτερες από 1 mm μπορούν να θεωρηθούν σημειακές. Γενικότερα, η προσέγγιση μιας χωρικά εκτεταμένης πηγής ακτινοβολίας με μία ή περισσότερες (κατανομή) σημειακές πηγές βρίσκει πολύ συχνά εφαρμογή σε ρεαλιστικά προβλήματα ακτινοπροστασίας/δοσιμετρίας, καθώς απλοποιεί τη γεωμετρία και καθιστά εφικτή την αναλυτική τους επίλυση με ικανοποιητική ακρίβεια.

Ροή σε πεδίο ακτινοβολίας

Χαρακτηριστικό μέγεθος που περιγράφει το πεδίο της ακτινοβολίας σε κάποιο σημείο είναι η ροή (fluence) Φ και ο αντίστοιχος ρυθμός ροής (fluence rate) $d\Phi/dt$. Η

ροή Φ σε ένα σημείο του πεδίου καθορίζει τον αριθμό dN των σωματίων της ακτινοβολίας που διέρχονται από εμβαδό dS στο θεωρούμενο σημείο:

$$\rho \text{ ο ή } \Phi = \frac{dN}{dS} \quad (\text{m}^{-2})$$

Για την περίπτωση σημειακής πηγής γ -ακτινοβολίας η οποία εκπέμπει φωτόνια ισότροπα στο χώρο (γεωμετρία 4π), η ροή σε σημείο εντός του πεδίου ακτινοβολίας ορίζεται ως ο αριθμός φωτονίων που διέρχονται από στοιχειώδες εμβαδό dS σε επιφάνεια σφαίρας (ισότροπη εκπομπή) στο θεωρούμενο σημείο. Από τη γεωμετρία του προβλήματος, είναι εύκολο να αποδειχθεί ότι ο ρυθμός ροής $d\Phi/dt$ σε απόσταση r από τη σημειακή πηγή γ -ακτινοβολίας **στον αέρα** δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{S}{4\pi r^2}$$

όπου S είναι η ισχύς της πηγής, οριζόμενη ως ο αριθμός των γ που εκπέμπονται ανά διάσπαση. Για σημειακές πηγές ισχύει: $S = C \cdot \sum_i f_i$, όπου C είναι η ενεργότητα της πηγής και f_i είναι το ποσοστό εκπομπής των ακτίνων- γ ενέργειας i (κανονικοποιημένο ανά διάσπαση του ραδιενεργού ισотоπού). Επομένως η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\frac{d\Phi}{dt} = C \cdot \sum_i f_i \frac{1}{4\pi r^2} \quad (9-5)$$

Από τη σχέση 9-5 είναι φανερό ότι η ροή, Φ , και επομένως ο ρυθμός ροής σε πεδίο γ -ακτινοβολίας γύρω από σημειακή πηγή μεταβάλλονται **αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης** από την πηγή (**νόμος αντίστροφων τετραγώνων**).

Παράδειγμα 2: Να υπολογιστεί ο ρυθμός ροής σε απόσταση 1 m στον αέρα από σημειακές πηγές ενεργότητας 1 mCi ($=3.7 \cdot 10^7 \text{ Bq}$) α) ^{60}Co και β) ^{137}Cs .

$$^{60}\text{Co} : \frac{d\Phi}{dT} = C \frac{\sum f_i}{4\pi r^2} = 3,7 \cdot 10^7 \frac{2}{4\pi(1)^2} = 5,89 \cdot 10^6 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} = 589 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$^{137}\text{Cs} : \frac{d\Phi}{dT} = C \frac{\sum f_i}{4\pi r^2} = 3,7 \cdot 10^7 \frac{0,86}{4\pi(1)^2} = 2,53 \cdot 10^6 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} = 253 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Ο νόμος των αντίστροφων τετραγώνων, στην περίπτωση σημειακών πηγών, είναι πολύ σημαντικός και η σωστή αξιοποίησή του αποτελεί ένα από τα βασικά μέτρα ακτινοπροστασίας. Οι αντίστοιχοι ρυθμοί του προηγούμενου παραδείγματος σε απόσταση **10 cm** ($= 0,1 \text{ m}$) από την πηγή, εκατονταπλασιάζονται αφού $1^2/(0,1)^2 = 100$.

Για την περίπτωση **παράλληλης δέσμης** φωτονίων, είναι φανερό ότι ο νόμος των αντιστρόφων τετραγώνων δεν ισχύει. Ο ρυθμός ροής, $d\Phi/dt$, σε κάποιο σημείο κατά μήκος παράλληλης δέσμης φωτονίων δίνεται από την ένταση, I (φωτ./m²/sec), της δέσμης στο θεωρούμενο σημείο. Αν και η ένταση δεν εξασθενεί λόγω γεωμετρίας όπως στην περίπτωση σημειακής πηγής, η υπόθεση ότι παραμένει αμετάβλητη καθώς η δέσμη διαδίδεται σε ένα υλικό μέσο (π.χ. αέρας) δεν ευσταθεί, αφού μέχρι τώρα δεν έχουμε λάβει υπόψιν μας την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με το υλικό μέσο που παρεμβάλλεται μεταξύ της πηγής και του σημείου μέτρησης του ρυθμού ροής ή της έντασης. Οι κυριότεροι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης των φωτονίων με την ύλη είναι το **φωτοηλεκτρικό φαινόμενο**, η ασύμφωνη σκέδαση (**σκέδαση Compton**) και η **δίδυμη γένεση**. Σε κάθε περίπτωση, η αλληλεπίδραση των φωτονίων με την ύλη οδηγεί σε εξασθένιση της δέσμης, δηλαδή σε απώλεια φωτονίων, άρα και ενέργειας από την αρχική δέσμη. Ανάλογα με το μηχανισμό αλληλεπίδρασης ένα ποσοστό της ενέργειας αυτής απορροφάται στο υλικό ενώ το υπόλοιπο διαφεύγει (σκέδαση φωτονίου).

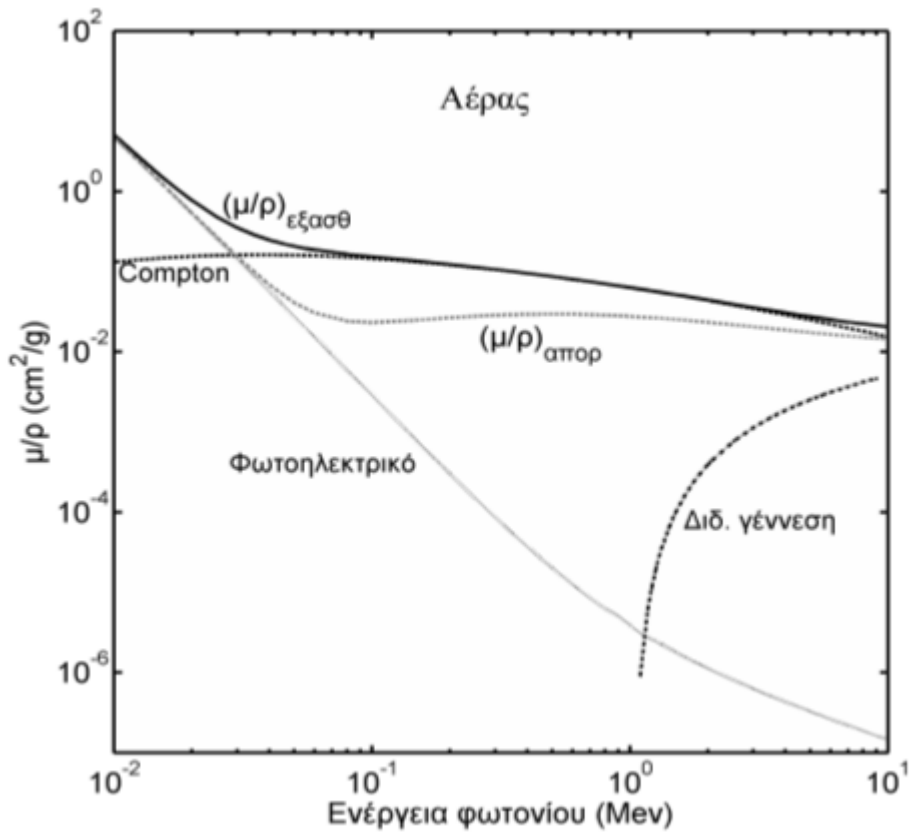
Για την περίπτωση λεπτής (γεωμετρικά), μονοενεργειακής δέσμης φωτονίων αποδεικνύεται ότι η ένταση, I , εξασθενεί εκθετικά καθώς η δέσμη διαδίδεται σε κάποιο υλικό μέσο:

$$I_x = I_0 e^{-\mu x} = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho} \rho x\right)}$$

όπου, I_0 είναι η αρχική ένταση της δέσμης, x είναι το μήκος που έχει διανύσει η δέσμη εντός του υλικού πυκνότητας ρ , και μ ο γραμμικός συντελεστής εξασθένισης της ακτινοβολίας από την αλληλεπίδραση των φωτονίων με το υλικό. Ο μ έχει μονάδες cm⁻¹ και εξαρτάται από την ενέργεια των φωτονίων και το υλικό. Μακροσκοπικά ο μ (ή ακριβέστερα ο μαζικός συντελεστής εξασθένισης μ/ρ) μπορεί να θεωρηθεί ως μέτρο της πιθανότητας αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με την ύλη και επομένως της απομάκρυνσης ενός φωτονίου από την αρχική δέσμη. Κατ' αναλογία ορίζεται ο γραμμικός και μαζικός συντελεστής απορρόφησης, μ_a και μ_a/ρ αντίστοιχα. Ο λόγος μ_a/μ εκφράζει το ποσοστό της αρχικής ενέργειας που απορροφήθηκε από την ύλη (βλέπε άσκηση2, σχέση 2-9). Στον Πίνακα (9-2) παρουσιάζονται οι επιμέρους μαζικοί συντελεστές εξασθένισης για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και την σκέδαση Compton καθώς και οι συνολικοί μαζικοί συντελεστές εξασθένισης και απορρόφησης για την αλληλεπίδραση φωτονίων με τον αέρα συναρτήσει της ενέργειας του φωτονίου και η γραφική τους παράσταση στο σχήμα (9-5).

Πίνακας 9-2 Αέρας ($\rho = 0,001205 \text{ g/cm}^3$)

Ενέργεια φωτονίου (Mev)	$(\mu/\rho)_{\text{Compton}}$ (cm^2/g)	$(\mu/\rho)_{\text{Φωτοηλεκτρικό}}$ (cm^2/g)	$(\mu/\rho)_{\text{εξασθένησης}}$ Ολικός (cm^2/g)	$(\mu/\rho)_{\text{απορρόφησης}}$ Ολικός (cm^2/g)
1.0000E-02	1.3200E-01	4.7700E+00	5.1200E+00	4.7420E+00
2.0000E-02	1.5600E-01	5.3500E-01	7.7800E-01	5.3890E-01
3.0000E-02	1.6200E-01	1.4500E-01	3.5400E-01	1.5370E-01
4.0000E-02	1.6300E-01	5.7000E-02	2.4800E-01	6.8330E-02
5.0000E-02	1.6100E-01	2.7500E-02	2.0800E-01	4.0980E-02
6.0000E-02	1.5900E-01	1.5200E-02	1.8700E-01	3.0410E-02
7.0000E-02	1.5600E-01	9.1600E-03	1.7500E-01	2.6100E-02
8.0000E-02	1.5200E-01	5.9100E-03	1.6600E-01	2.4070E-02
9.0000E-02	1.4900E-01	4.0200E-03	1.6000E-01	2.3500E-02
1.0000E-01	1.4600E-01	2.8500E-03	1.5400E-01	2.3250E-02
2.0000E-01	1.2200E-01	3.0300E-04	1.2300E-01	2.6720E-02
3.0000E-01	1.0600E-01	8.6000E-05	1.0700E-01	2.8720E-02
4.0000E-01	9.5100E-02	3.7000E-05	9.5500E-02	2.9490E-02
5.0000E-01	8.6900E-02	2.0000E-05	8.7100E-02	2.9660E-02
6.0000E-01	8.0400E-02	1.2500E-05	8.0600E-02	2.9530E-02
6.6170E-01	7.7000E-02	9.7000E-06	7.7200E-02	2.9400E-02
8.0000E-01	7.0600E-02	6.3000E-06	7.0700E-02	2.8820E-02
9.0000E-01	6.6800E-02	5.0700E-06	6.6900E-02	2.8400E-02
1.0000E+00	6.3500E-02	3.9100E-06	6.3600E-02	2.7890E-02
1.1730E+00	5.8700E-02	2.7300E-06	5.8800E-02	2.7000E-02
1.2500E+00	5.6800E-02	2.4800E-06	5.6900E-02	2.6660E-02
1.2750E+00	5.6200E-02	2.4000E-06	5.6300E-02	2.6500E-02
1.3000E+00	5.5600E-02	2.3100E-06	5.5600E-02	2.6400E-02
1.3320E+00	5.5000E-02	2.2300E-06	5.5000E-02	2.6300E-02
1.5000E+00	5.1600E-02	1.8000E-06	5.1700E-02	2.5470E-02
1.6000E+00	4.9400E-02	1.5600E-06	4.9600E-02	2.5000E-02
1.7610E+00	4.7400E-02	1.3700E-06	4.7600E-02	2.4400E-02
2.0000E+00	4.4100E-02	1.1300E-06	4.4500E-02	2.3450E-02
3.0000E+00	3.4700E-02	6.2800E-07	3.5800E-02	2.0570E-02
4.0000E+00	2.8900E-02	4.3000E-07	3.0800E-02	1.8700E-02
5.0000E+00	2.5000E-02	3.2500E-07	2.7500E-02	1.7400E-02
6.0000E+00	2.2100E-02	2.6100E-07	2.5200E-02	1.6470E-02
7.0000E+00	1.9800E-02	2.1800E-07	2.3500E-02	1.5800E-02
8.0000E+00	1.8100E-02	1.8700E-07	2.2300E-02	1.5250E-02
9.0000E+00	1.6600E-02	1.6400E-07	2.1300E-02	1.4800E-02
1.0000E+01	1.5400E-02	1.4500E-07	2.0400E-02	1.4500E-02



Σχήμα 9-5

Στο Παράδειγμα 2, ο υπολογισμός του ρυθμού ροής σε απόσταση 1 m στον αέρα από σημειακές πηγές γ-ακτινοβολίας, έγινε χωρίς να λάβουμε υπόψιν μας την εξασθένιση της ακτινοβολίας κατά τη διαδρομή της σε 1 m αέρα, υπονοώντας ότι είναι αμελητέα και πάντως πολύ πιο μικρή από την εξασθένιση στη ροή που επιβάλλει ο παράγοντας γεωμετρίας. Το ακόλουθο παράδειγμα θα σας πείσει.

Παράδειγμα 3: Να υπολογιστεί η εξασθένιση, $I_0 - I$, σε μία λεπτή δέσμη ακτίνων γ ενέργειας 1,25 MeV και αρχικής έντασης I_0 , που διέρχεται από αέρα ($\rho = 0,001205 \text{ g/cm}^3$) πάχους 10 m.

Από τον πίνακα 9-2, βρίσκουμε ότι για ενέργεια φωτονίου 1,25 MeV ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένισης είναι $(\mu/\rho)_{\alpha\epsilon\rho\alpha\varsigma} = 0.0569 \text{ cm}^2/\text{g}$. Επομένως: $I = I_0 \exp(-\mu x) = I_0 \exp(-0,0569 \times 0,001205 \times 10 \times 100) = 0,93 I_0$. Άρα $I_0 - I = 0,07 I_0$!

Συνεπώς η ροή από μια πηγή που βρίσκεται σε απόσταση 10 m από εσάς, στην άλλη άκρη του εργαστηρίου, εξασθενεί ελάχιστα (~7%) λόγω του αέρα που παρεμβάλλεται, αλλά μειώνεται εξαιρετικά λόγω του νόμου των αντιστρόφων τετραγώνων (γίνεται 100 φορές μικρότερη από τη ροή στο 1 m).

Μεταφορά ενέργειας από ακτινοβολία σε υλικό

Γνωρίζοντας την ροή, Φ , σε σημείο του πεδίου γ-ακτινοβολίας μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε αναλυτικά τη μέση ενέργεια που **μεταφέρεται** από ακτινοβολία στο στοιχειώδη όγκο που περιβάλλει το σημείο ενδιαφέροντος. Ας θεωρήσουμε την περίπτωση δέσμης φωτονίων ενέργειας E_γ , η οποία διαδίδεται σε υλικό μέσο (π.χ. αέρας). Όπως προαναφέραμε, ο μαζικός συντελεστής εξασθένησης, εκφράζει μακροσκοπικά την πιθανότητα αλληλεπίδρασης των φωτονίων με την ύλη. Επομένως το γινόμενο της ροής επί το μαζικό συντελεστή εξασθένησης (για ενέργεια E_γ και δεδομένο υλικό), δίνει τον αριθμό των φωτονίων που θα αλληλεπιδράσουν με την ύλη στο σημείο ενδιαφέροντος. Η μέση ενέργεια που μεταφέρεται στην ύλη ανά αλληλεπίδραση φωτονίου-ύλης είναι ίση με $\left(\frac{\mu_a}{\mu}\right)_v \cdot E_\gamma$, όπου μ_a και μ είναι οι γραμμικοί συντελεστές απορρόφησης και εξασθένησης αντίστοιχα. Ο ρυθμός μεταφοράς ενέργειας, dE_{tr}/dt , τότε είναι:

$$\frac{dE_{tr}}{dt} = \frac{d\Phi}{dt} \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_v \left(\frac{\mu_a}{\mu}\right)_v E_\gamma = \frac{d\Phi}{dt} \left(\frac{\mu_a}{\rho}\right)_v E_\gamma \quad (9-6)$$

Έκθεση- KERMA

Ειδικά για την αλληλεπίδραση **φωτονίων** με τον **αέρα** ορίζεται το μέγεθος έκθεση, **X**.

Ο ορισμός της έκθεσης δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{X} = \frac{dQ}{dm} \quad (\text{τυπική μονάδα } \mathbf{Roentgen}: 1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Cb/kg})$$

όπου dQ το ολικό φορτίο (κατ' απόλυτη τιμή) των ιόντων κάθε φορτίου (θετικού ή αρνητικού) που δημιουργήθηκαν στη μάζα αέρα dm σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Θυμίζουμε (και είναι πολύ βασικό) ότι ο ιονισμός του αέρα γίνεται έμμεσα από τα ηλεκτρόνια στα οποία μεταφέρεται ενέργεια κατά την (αρχική) αλληλεπίδραση φωτονίου-αέρα. Τα ηλεκτρόνια αυτά που ελευθερώνονται θα αποθέσουν στη συνέχεια την ενέργειά τους ιονίζοντας τον αέρα. Επομένως, μπορεί να υπολογιστεί η ενέργεια που πρέπει να εναποτεθεί σε 1 g αέρα όταν η έκθεση είναι 1 R. Η ενέργεια που κατά μέσο όρο απαιτείται για το σχηματισμό ενός ζεύγους ιόντων στον αέρα υπολογίζεται (πειραματικά) σε 33,7 eV. Επομένως 1 R ισοδυναμεί με

σχηματισμό $2,5810^{-4}/1,6 \cdot 10^{-19}$ ζευγών ιόντων και άρα:

$$1 R = (2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Cb}/1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}) \cdot 33,7 \text{ eV/kg} = 5,43 \cdot 10^7 \text{ MeV/g} \quad (9-7)$$

Η τελευταία σχέση επιτρέπει τον υπολογισμό της έκθεσης όταν είναι γνωστή η ροή και η ενέργεια της ακτινοβολίας. Χρησιμοποιώντας τη σχέση (9-6) για αέρα ως υλικό μέσο και εκφράζοντας τον μαζικό συντελεστή απορρόφησης σε cm^2/g και την ενέργεια E_γ των φωτονίων σε MeV, ο ρυθμός έκθεσης, dX/dt , σε σημείο του πεδίου της γ -ακτινοβολίας, μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{d\Phi}{dt} E_\gamma \frac{(\mu_a/\rho)_a}{5,4310^7} \quad (\sigma\epsilon R/s) \quad (9-8)$$

Στην περίπτωση σημειακής πηγής, $d\Phi/dt = C \sum f_i \cdot 1/4\pi r^2$, η σχέση (9-8) γράφεται:

$$\frac{dX}{dt} = \left(\frac{C}{4\pi} \cdot 5,43 \cdot 10^7 \right) \sum f_i E_i (\mu_a/\rho)_{a,i} \frac{1}{r^2} \quad (\sigma\epsilon R/s) \quad (9-9)$$

Η έκθεση είναι ιστορικά το πρώτο μέγεθος που χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει την ποσότητα εναποτιθέμενης ενέργειας στην ύλη και συγκεκριμένα στον αέρα. Στη μέτρηση του μεγέθους αυτού στηρίζονται και οι θάλαμοι ιονισμού, οι οποίοι συλλέγουν και μετρούν το φορτίο που παράγεται από ιονισμό στον ευαίσθητό τους όγκο (αέρας). Οι θάλαμοι ιονισμού είναι οι ανιχνευτές που μέχρι και σήμερα αποτελούν αναφορά στην μέτρηση της εναποτιθέμενης ενέργειας από ακτινοβολία. Είναι δε σε ευρεία χρήση όπου απαιτείται αξιόπιστη και ακριβής μέτρηση δόσης (νοσοκομεία, εργαστήρια, ραδιενέργεια περιβάλλοντος, πυρηνικοί αντιδραστήρες κλπ).

Για λόγους εναρμόνισης με το σύστημα μονάδων SI, η έκθεση έχει αντικατασταθεί από το ισοδύναμο μέγεθος **KERMA** (**K**inetic **E**nergy **R**eleased per unit **M**ass) **στον αέρα**. Οι έμμεσα ιονίζουσες ακτινοβολίες (φωτόνια ή νετρόνια) κατά την αλληλεπίδρασή τους με την ύλη μεταφέρουν όλη ή μέρος της ενέργειάς τους σε φορτισμένα σωμάτια (ηλεκτρόνια ή πυρήνες αντίστοιχα). Το KERMA περιγράφει την ενέργεια που μεταφέρεται από τα φορτισμένα σωμάτια στα αφόρτιστα και ορίζεται ως εξής:

$$\mathbf{K} = \frac{dE}{dm} \quad (\text{τυπική μονάδα } 1 \text{ Gray: } 1\text{Gy} = 1 \text{ Joule/Kg})$$

όπου dE είναι η συνολικά μεταφερόμενη ενέργεια σε φορτισμένα σωματίδια (ηλεκτρόνια ή πυρήνες) στη στοιχειώδη μάζα dm του υλικού.

Γνωρίζοντας ότι $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$, προκύπτει εύκολα ότι $1 \text{ Gy} = 1/1.6 \cdot 10^{10} \text{ MeV/g}$. Συνεπώς, με τη βοήθεια της σχέσης (9-7), έχουμε:

$$1R = 0.00873 \text{ Gy} \quad \underline{\text{στον αέρα}} \quad (9-10)$$

Με τη βοήθεια της παραπάνω σχέσης καθώς και της (9-9), ο ρυθμός KERMA στον αέρα για σημειακή πηγή γ-ακτινοβολίας, δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{dK}{dt} = 0.00873 \frac{dX}{dt} = 0.00873 \left(\frac{C}{4\pi} 5,43 \cdot 10^7 \right) \sum f_i E_i (\mu_a / \rho)_{a,i} \frac{1}{r^2} \quad (9-11)$$

Η σχέση (9-11) περιέχει σταθερές που είναι γνωστές για ένα ραδιενεργό παρασκεύασμα. Θέτοντας:

$$\Gamma_K = \frac{0,00873 \cdot 5,43 \cdot 10^7}{4\pi} \sum f_i E_i \left(\frac{\mu_a}{\rho} \right)_{a,i}$$

προκύπτει η πολύ εύχρηστη σχέση:

$$\frac{dK}{dt} = \Gamma_K C \frac{1}{r^2} \quad (9-12)$$

Το Γ_K ονομάζεται σταθερά ρυθμού KERMA στον αέρα με μονάδες $\text{m}^2 \text{ Gy Bq}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Στον πίνακα (9-3) δίνονται τιμές της σταθεράς ρυθμού KERMA στον αέρα για φωτόνια ενέργειας άνω των 20 keV (Γ_{20}).

Παράδειγμα 4: Να υπολογιστεί ο ρυθμός KERMA στον αέρα σε απόσταση 1 m από σημειακή πηγή ^{60}Co ενεργότητας 30 kBq και αντίστοιχα από πηγή ^{137}Cs ίδιας ενεργότητας (τυπικές τιμές ενεργότητας και αποστάσεων που συναντάμε στις ασκήσεις του εργαστηρίου).

Πίνακας 9-3

Ραδιενεργό ισότοπο	Σταθερά ρυθμού Kerma στον αέρα Γ_{20} ($\text{m}^2 \text{ Gy Bq}^{-1} \text{ s}^{-1}$)
^{15}O	38.75×10^{-18}
^{22}Na	79.16×10^{-18}
^{24}Na	119.33×10^{-18}
^{57}Co	3.80×10^{-18}
^{60}Co	85.82×10^{-18}
^{99}Mo	9.51×10^{-18}
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	3.93×10^{-18}
^{111}In	21.24×10^{-18}
^{123}I	10.03×10^{-18}
^{125}I	9.25×10^{-18}
^{131}I	14.16×10^{-18}
^{137}Cs	21.80×10^{-18}
^{201}Tl	2.95×10^{-18}
^{192}Ir	30.42×10^{-18}
^{198}Au	15.61×10^{-18}

Από τον πίνακα (9-3) έχουμε:

Για το κοβάλτιο $\Gamma_{20} = 85,82 \times 10^{-18} \text{ m}^2 \text{ Gy Bq}^{-1} \text{ s}^{-1}$ άρα

$$dK/dt = 85,82 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2 \text{ Gy Bq}^{-1} \text{ s}^{-1} \cdot 30 \text{ kBq /1m}^2 = 2,5746 \cdot 10^{-12} \text{ Gy/s.}$$

Οπότε το συνολικό KERMA στο τρίωρο άσκησης του εργαστηρίου είναι:

$$2,5746 \cdot 10^{-12} \text{ Gy/s} \cdot 3\text{h} \cdot 3600 \text{ s/h} = 2,8 \cdot 10^{-8} \text{ Gy} = 28 \text{ nGy}$$

Για το καίσιο τα αντίστοιχα αποτελέσματα είναι $dK/dt = 654 \cdot 10^{-15} \text{ Gy/s}$ και $K = 7 \text{ nGy}$ (η τιμή είναι το $\frac{1}{4}$ της αντίστοιχης για το κοβάλτιο αφού αυτός είναι και ο λόγος των Γ_{20} για τις δύο πηγές, δεδομένης της ίδιας γεωμετρίας και ενεργότητας των πηγών)

Δόση

Την απόθεση ενέργειας σε υλικό καθορίζει η **δόση** (dose) D:

$$\text{Δόση } D = \frac{dE}{dm} \quad (\text{Μονάδα S.I.: Gray, } 1 \text{ Gy} = 1\text{J/kg}) \quad (9-13)$$

όπου dE η ενέργεια που θα αποθεθεί στη στοιχειώδη μάζα dm κατά την αλληλεπίδραση ακτινοβολίας (οποιασδήποτε) στο υλικό.

Η δόση στον αέρα υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ενεργειακή ροή στο σημείο ενδιαφέροντος (όπως και στο KERMA) και πολλαπλασιάζοντας με την πιθανότητα απορρόφησης της ακτινοβολίας. Στις περισσότερες των περιπτώσεων ισχύει η παραδοχή ότι όλη η διαθέσιμη ενέργεια απορροφάται τελικά, δηλαδή ότι η δόση ισούται με το KERMA. Εάν στο σημείο ενδιαφέροντος βρεθεί άλλο υλικό (βιολογικού ενδιαφέροντος, όπου και ο υπολογισμός της δόσης αποκτά νόημα) ο υπολογισμός της εναποτιθέμενης δόσης απαιτεί τη χρήση της πιθανότητας απορρόφησης ακτινοβολίας για το συγκεκριμένο υλικό και την ενέργεια της ακτινοβολίας. Μπορούμε να γράψουμε:

$$\text{Υλικό : } \left(\frac{dD}{dt} \right)_v = \left(\frac{dD}{dt} \right)_a \frac{(\mu_a/\rho)_v}{(\mu_a/\rho)_a} = \left(\frac{dK}{dt} \right)_a \frac{(\mu_a/\rho)_v}{(\mu_a/\rho)_a} \quad (9-14)$$

όπου $(\mu_a/\rho)_v$ και $(\mu_a/\rho)_a$ οι μαζικοί συντελεστές απορρόφησης για το υλικό και τον αέρα αντίστοιχα (βγάζουμε την εξάρτηση από τον αέρα και βάζουμε την εξάρτηση από το υλικό). Ουσιαστικά λοιπόν γνωρίζοντας το KERMA στον αέρα από συγκεκριμένη ακτινοβολία γ μπορούμε να υπολογίσουμε τη δόση σε κάθε υλικό που μας ενδιαφέρει και θα βρεθεί στο ίδιο σημείο μέσα στο πεδίο ακτινοβολίας.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι παρόλο που η δόση και το KERMA έχουν τις ίδιες μονάδες και σε πλείστες περιπτώσεις είναι ίσες δεν θα πρέπει να συγχέονται. Θα πρέπει να γίνει ξεκάθαρη η εξής διαφορά:

το KERMA είναι μέτρο της διαθέσιμης ενέργειας ακτινοβολίας στο συγκεκριμένο σημείο που ενδιαφερόμαστε, ενώ **η δόση** καθορίζει το ποσό της ενέργειας που τελικά θα απορροφηθεί από μία μάζα που θα εκτεθεί στην ακτινοβολία στο σημείο αυτό.

Παράδειγμα 5: Για τις πηγές και τη γεωμετρία του παραδείγματος 4 να υπολογιστούν ο ρυθμός δόσης και η συνολική δόση για το τρίωρο χρονικό διάστημα της άσκησης σε απόσταση 1 m στον αέρα καθώς και σε μάζα νερού στην ίδια απόσταση από τις πηγές αυτές.

Από το παράδειγμα 4 έχουμε για απόσταση ενός μέτρου στον αέρα:

Για το κοβάλτιο $dK/dt = 2,6 \cdot 10^{-12}$ Gy/s. Θεωρώντας ότι όλη η διαθέσιμη ενέργεια απορροφάται από τον αέρα στο 1 m ο ρυθμός δόσης θα είναι $dD/Dt = 2,6 \cdot 10^{-12}$ Gy/s.

Για το τρίωρο της άσκησης η απορροφούμενη δόση στον αέρα θα είναι $D = 28$ nGy.

Για το καίσιο αντίστοιχα $dK/dt = 654 \cdot 10^{-15}$ Gy/s και $D = 7$ nGy.

Οι δόσεις αυτές αφορούν στον αέρα και όχι στην εναποτιθέμενη στο νερό ενέργεια, την οποία θέλουμε να υπολογίσουμε για να εκτιμήσουμε τη δόση που λαμβάνει μάζα νερού στο ίδιο σημείο (το νερό θεωρείται ισοδύναμο στην αλληλεπίδρασή του με την ακτινοβολία με τους μαλακούς ιστούς). Για το σκοπό αυτό χρειαζόμαστε τους συντελεστές απορρόφησης για το νερό στις ενέργειες του κοβαλτίου και του καϊσίου. Οι συντελεστές αυτοί παρουσιάζονται στον πίνακα (9-4) και η γραφική τους παράσταση για ενέργειες από 10 keV μέχρι 10 MeV στο σχήμα (9-6).

Από τη σχέση (9-14) και χρησιμοποιώντας το λόγο των συντελεστών απορρόφησης

$\frac{(\mu_a/\rho)_v}{(\mu_a/\rho)_a}$ που για το κοβάλτιο είναι 1,1121 και για το καίσιο 1,1122 βρίσκουμε:

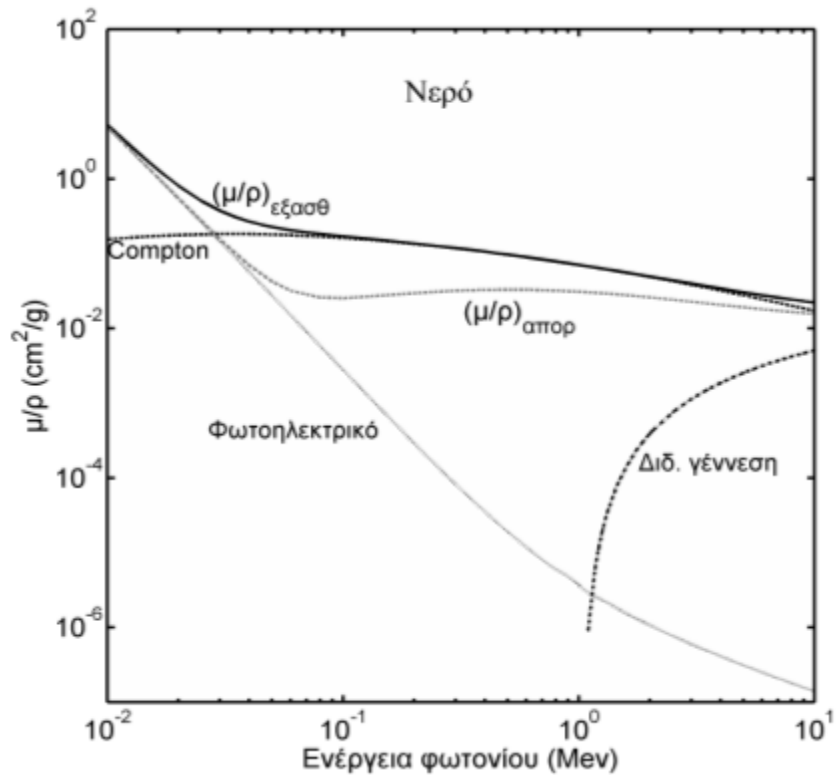
Κοβάλτιο $dD/dt_{\text{νερό}} = 1,1121 \times 2,6 \cdot 10^{-12}$ Gy/s = $2,89 \cdot 10^{-12}$ Gy/s και $D = 31,21$ nGy

Καίσιο $dD/dt_{\text{νερό}} = 1,1122 \times 0,654 \cdot 10^{-12}$ Gy/s = $0,727 \cdot 10^{-12}$ Gy/s και $D = 7,85$ nGy

(Οι τιμές αυτές ισχύουν χωρίς να ληφθεί κανένα πρόσθετο μέτρο προστασίας και για συνεχή έκθεση στο πεδίο ακτινοβολίας των πηγών. Θα πρέπει δε να συγκριθούν με την τιμή $3 \cdot 60$ nGy/h = 180 nGy που δέχεται κανείς από τη φυσική ακτινοβολία περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της άσκησης στο εργαστήριο Πυρηνικής Φυσικής)

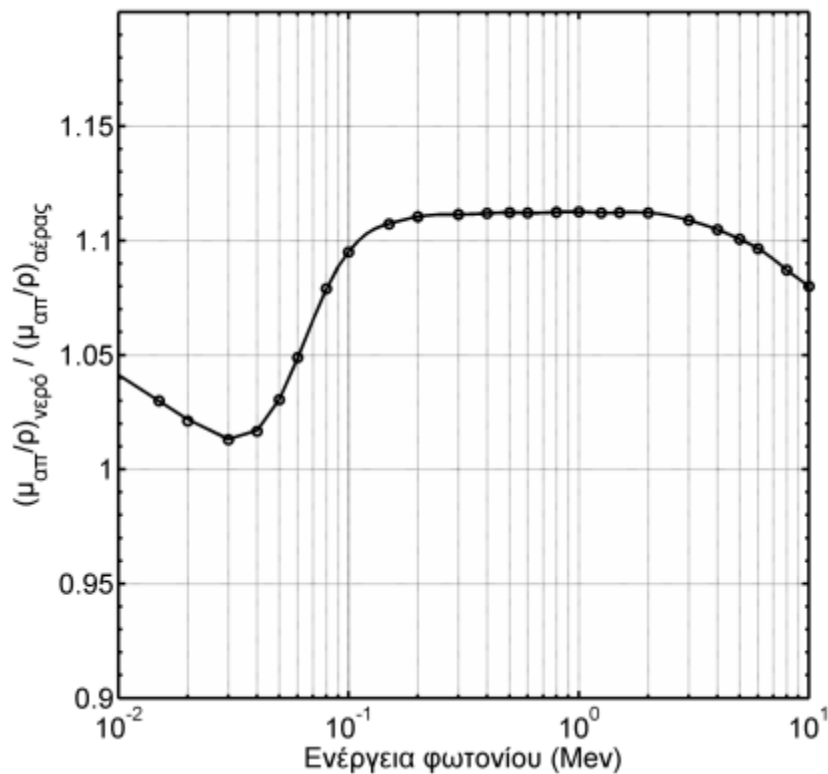
Πίνακας 9-4 Νερό ($\rho = 1 \text{ g/cm}^3$)

Ενέργεια φωτονίου (Mev)	$(\mu/\rho)_{\text{Compton}}$ (cm^2/g)	$(\mu/\rho)_{\text{Φωτοηλεκτρικό}}$ (cm^2/g)	<math>(\mu/\rho)_{\text{εξασθένησης Ολικός}}</math> (cm^2/g)	<math>(\mu/\rho)_{\text{απορρόφησης Ολικός}}</math> (cm^2/g)
1.0000E-02	1.5500E-01	4.9400E+00	5.3300E+00	4.9440E+00
2.0000E-02	1.7700E-01	5.4400E-01	8.1000E-01	5.5030E-01
3.0000E-02	1.8300E-01	1.4600E-01	3.7600E-01	1.5570E-01
4.0000E-02	1.8300E-01	5.6800E-02	2.6800E-01	6.9470E-02
5.0000E-02	1.8000E-01	2.7200E-02	2.2700E-01	4.2230E-02
6.0000E-02	1.7700E-01	1.4900E-02	2.0600E-01	3.1900E-02
7.0000E-02	1.7300E-01	8.9700E-03	1.9300E-01	2.7800E-02
8.0000E-02	1.7000E-01	5.7700E-03	1.8400E-01	2.5970E-02
9.0000E-02	1.6600E-01	3.9100E-03	1.7700E-01	2.5600E-02
1.0000E-01	1.6300E-01	2.7600E-03	1.7100E-01	2.5460E-02
2.0000E-01	1.3500E-01	2.8900E-04	1.3700E-01	2.9670E-02
3.0000E-01	1.1800E-01	8.1600E-05	1.1900E-01	3.1920E-02
4.0000E-01	1.0600E-01	3.4900E-05	1.0600E-01	3.2790E-02
5.0000E-01	9.6600E-02	1.8800E-05	9.6900E-02	3.2990E-02
6.0000E-01	8.9400E-02	1.1700E-05	8.9600E-02	3.2840E-02
6.6170E-01	8.5600E-02	9.1100E-06	8.5800E-02	3.2700E-02
8.0000E-01	7.8600E-02	5.9200E-06	7.8700E-02	3.2060E-02
9.0000E-01	7.4300E-02	4.7800E-06	7.4400E-02	3.1600E-02
1.0000E+00	7.0700E-02	3.6800E-06	7.0700E-02	3.1030E-02
1.1730E+00	6.5300E-02	2.5600E-06	6.5300E-02	3.0100E-02
1.2500E+00	6.3200E-02	2.3300E-06	6.3200E-02	2.9650E-02
1.2750E+00	6.2500E-02	2.2600E-06	6.2600E-02	2.9500E-02
1.3000E+00	6.1800E-02	2.1700E-06	6.1900E-02	2.9400E-02
1.3320E+00	6.1100E-02	2.1000E-06	6.1200E-02	2.9200E-02
1.5000E+00	5.7400E-02	1.6900E-06	5.7500E-02	2.8330E-02
1.6000E+00	5.4900E-02	1.4600E-06	5.5100E-02	2.7800E-02
1.7610E+00	5.2700E-02	1.2900E-06	5.2900E-02	2.7100E-02
2.0000E+00	4.9000E-02	1.0600E-06	4.9400E-02	2.6080E-02
3.0000E+00	3.8500E-02	5.9400E-07	3.9700E-02	2.2810E-02
4.0000E+00	3.2200E-02	4.0800E-07	3.4000E-02	2.0660E-02
5.0000E+00	2.7800E-02	3.0900E-07	3.0300E-02	1.9150E-02
6.0000E+00	2.4500E-02	2.4800E-07	2.7700E-02	1.8060E-02
7.0000E+00	2.2100E-02	2.0700E-07	2.5800E-02	1.7200E-02
8.0000E+00	2.0100E-02	1.7800E-07	2.4300E-02	1.5660E-02
9.0000E+00	1.8500E-02	1.5600E-07	2.3100E-02	1.6100E-02
1.0000E+01	1.7100E-02	1.3900E-07	2.2200E-02	1.4500E-02



Σχήμα 9-6

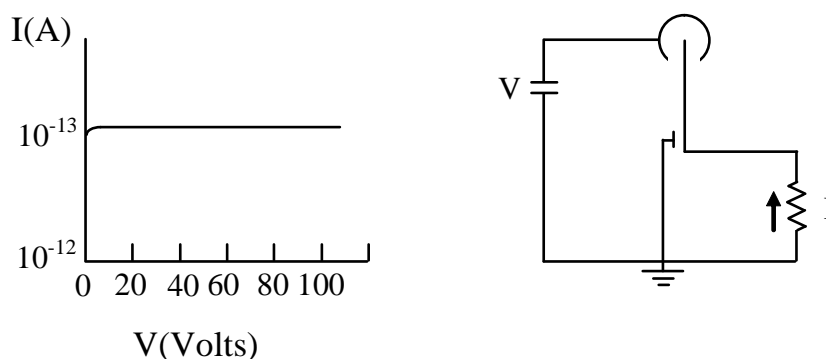
Παρατηρήστε ότι ο λόγος των μαζικών συντελεστών απορρόφησης για τα δύο ισότοπα του παραδείγματος είναι ίδιος. Το γεγονός αυτό δεν είναι τυχαίο· αντιθέτως ισχύει για όλες τις πηγές ακτινοβολίας γ του εργαστηρίου και γενικότερα για κάθε δέσμη ακτινοβολίας γ ενέργειας από 100 keV μέχρι 2 MeV, όπως φαίνεται και στο σχήμα (9-7). Η σταθερότητα αυτή του λόγου των συντελεστών απορρόφησης επιτρέπει



Σχήμα 9-7

τον άμεσο υπολογισμό της δόσης σε νερό (άρα ισοδύναμα και μαλακού ιστού) από μετρήσεις θαλάμων ιονισμού με αέρα, πρακτική που χρησιμοποιείται ευρέως στην πειραματική δοσιμετρία με θαλάμους ιονισμού.

Στην παρούσα άσκηση θα ασχοληθούμε με τη δοσιμετρία γ-ακτινοβολίας. Για τις μετρήσεις θα χρησιμοποιηθούν διάταξη θαλάμου ιονισμού με ηλεκτρόμετρο (πικοαμπερόμετρο), καθώς και φορητά δοσιμετρα άμεσης ανάγνωσης του ρυθμού δόσης. Τα τελευταία είναι έτσι βαθμονομημένα ώστε να δίνουν κατευθείαν την δόση ακτινοβολίας στο νερό σε Sievert. Η διάταξη του θαλάμου ιονισμού που θα χρησιμοποιηθεί στο πρώτο μέρος της άσκησης περιλαμβάνει σφαιρικό θάλαμο που περιέχει αέρα σε ατμοσφαιρική πίεση. Ο δε ενεργός όγκος του θαλάμου είναι 1 lt. Τα ιόντα που σχηματίζονται στο εσωτερικό του θαλάμου λόγω της ακτινοβολίας, κινούνται προς τα ηλεκτρόδια του θαλάμου κάτω από την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου. Με τη βοήθεια ευαίσθητου ηλεκτρομέτρου μετράμε το ρεύμα που είναι της τάξης των 10^{-14} A. Στο σχήμα (9-8) δίνεται παραστατικά η συνδεσμολογία του θαλάμου και η χαρακτηριστική του καμπύλη $I = f(V)$.



Σχήμα (9-8)

III ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Α.Αγγελόπουλου - Λ.Σακελλίου, Σημειώσεις Υγειοφυσικής, Αθήνα 1984
2. » » » » , Εργαστηριακές Ασκήσεις Υγειοφυσικής »
3. Χ.Προυκάκη, Ιατρική Ακτινοφυσική, Γ. Παρισιάνος 1981
4. N.A.Dyson, An Introduction to nuclear physics with applications in medicine and biology, Ellis Horwood Limited 1981
5. J.R.Lamarsh, Nuclear Engineering, Addison-Wesley, 1983
6. J.Fitzgerald, Applied radiation protection and control, Gordon and Preach 1969
7. E.Glouna, J.Ledbetter, Principles of Radiological Health, M. Decker 1982

IV ΟΡΓΑΝΑ – ΠΗΓΕΣ

1. Θάλαμος ιονισμού συνεχούς ρεύματος με πικοαμπερόμετρο
2. Φορητός θάλαμος ιονισμού (δοσίμετρο) στιγμιαίου ρυθμού δόσης συνεχούς ανάγνωσης ($\mu\text{Sv/h}$)
3. Φορητό όργανο μέτρησης δόσης και ραδιορύπανσης με χρήση κρυστάλλου NaI και ανιχνευτή Geiger-Mueller
4. Φορητός ανιχνευτής Geiger-Mueller με φύλλο διαχωρισμού ακτινοβολίας β και γ
5. Πηγές ^{60}Co και ^{137}Cs

V ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΑΣΚΗΣΗΣ

1. Ανοίξτε το πικοαμπερόμετρο ώστε να έρθει σε θερμοκρασία λειτουργίας για λήψη αξιόπιστων μετρήσεων (βλέπε χαρακτηριστικά πικοαμπερομέτρου). Να ελεγχθεί ότι έχουν τεθεί οι κατάλληλες παράμετροι λειτουργίας του.
2. Λάβετε μετρήσεις της απόκρισης του θαλάμου ιονισμού (ρεύμα) συναρτήσει της μεταβολής της τάσης (V). Θα χρησιμοποιηθούν δύο πηγές ακτίνων γ , ^{60}Co και ^{137}Cs . Και οι δύο πηγές να θεωρηθούν σημειακές με τα στοιχεία που αναγράφονται επάνω στη θωρακισμένη θήκη τους. Να υπολογιστεί η σημερινή ενεργότητα για κάθε πηγή.
3. Χαράξτε τις δύο χαρακτηριστικές καμπύλες $I = f(V)$ του θαλάμου ιονισμού, με τα αντίστοιχα σφάλματα ανάγνωσης, στο ίδιο διάγραμμα και με διαφορετικά σύμβολα. Σχολιάστε τη μορφή της καμπύλης με βάση την αρχή λειτουργίας του θαλάμου ιονισμού. Γιατί οδηγείται σε κόρο;
4. Καταγράψτε τα ρεύματα κόρου για την περίπτωση κάθε πηγής. Γιατί η καμπύλη για το κάθε ισότοπο καταλήγει σε διαφορετικό ρεύμα κόρου; Συγκρίνετε τα ρεύματα κόρου μεταξύ των δύο πηγών. Γιατί διαφέρουν τόσο; Σχολιάστε και εξηγήστε την ποσοτική αυτή σχέση (λάβετε υπόψη τα χαρακτηριστικά των πηγών καθώς και του εκάστοτε ισότοπου από το διάγραμμα διάσπασής του).

5. Υπολογίστε τους ρυθμούς έκθεσης (dX/dt , σε R/hr) σε κάθε περίπτωση, χρησιμοποιώντας το αντίστοιχο ρεύμα κόρου (να σημειωθεί ότι οι θάλαμοι είναι συνεχούς ρεύματος και επομένως θα χρησιμοποιηθεί το $I_{\text{κορ}}/2$). Από αυτούς να υπολογιστούν οι αντίστοιχοι ρυθμοί KERMA (dK/dt , σε $\mu\text{Gy/hr}$) στον αέρα.
6. Υπολογίστε την απόσταση (r), στην οποία βρίσκεται ο θάλαμος από την εκάστοτε πηγή κατά τις μετρήσεις των ρυθμών έκθεσης/KERMA στο προηγούμενο βήμα. Χρησιμοποιήστε τη σχέση (9-12) και τα στοιχεία των πηγών.
7. Αν οι πηγές καθόλη τη διάρκεια της άσκησης βρίσκονταν εκτός θωράκισης ποια η συνολική δόση που θα απορροφούσε σε 3 ώρες βιολογικός ιστός που θα βρισκόταν σε απόσταση 1 m από την κάθε πηγή; (Θυμηθείτε το νόμο των αντιστρόφων τετραγώνων!!!). Να συγκριθεί η δόση αυτή (που θα λάμβανε φοιτητής αν εκτελούσε την άσκηση σε απόσταση 1 m από την εκάστοτε αθωράκιση πηγή) με τις δόσεις από συνήθεις ιατρικές εξετάσεις καθώς και με τα αντίστοιχα μέγιστα επιτρεπτά όρια δόσης. Σχολιάστε. Θα ήταν δικαιολογημένη η χρήση των πηγών χωρίς θωράκιση για το ζωρο του εργαστηρίου;
8. Χρησιμοποιώντας το φορητό θάλαμο ιονισμού καταγράψτε για την κάθε πηγή το ρυθμό δόσης στις θέσεις που κάθεστε κατά την εκτέλεση της άσκησης, επάνω στη θωρακισμένη θήκη της εκάστοτε πηγής (σημείο μέγιστου ρυθμού δόσης) καθώς και το ρυθμό δόσης υποβάθρου. Καταγράψτε επίσης το ρυθμό δόσης σε απόσταση $\sim 1\text{m}$ από την εκάστοτε πηγή, όταν αυτή βρίσκεται τοποθετημένη με το θωρακισμένο της κάλυμμα σε θέση μέτρησης στη θωρακισμένη θήκη του θαλάμου ιονισμού.
9. Υπολογίστε από τους ρυθμούς δόσης του βήματος 8 τη δόση που πραγματικά λαμβάνετε (για την εκάστοτε θέση) συνολικά κατά την εκτέλεση της άσκησης καθώς και την αντίστοιχη δόση που θα λάμβανε φοιτητής εαν στεκόταν στο σημείο μέγιστου ρυθμού δόσης επάνω στη θωράκιση. Συγκρίνετε τα αποτελέσματα και σχολιάστε σε σχέση με τις βασικές αρχές ακτινοπροστασίας, αλλά και σε σχέση με τα θεσπισμένα μέγιστα επιτρεπτά όρια δόσης.
10. Υπολογίστε τη δόση που θα λάμβανε φοιτητής καθόλη τη διάρκεια εκτέλεσης της άσκησης, καθημένο σε απόσταση 1 m από την πηγή. Συγκρίνετε τη δόση που υπολογίσατε με την αντίστοιχη δόση που υπολογίσατε στο ερώτημα 7, αν η πηγές

χρησιμοποιούνται χωρίς θωράκιση. Τεκμηριώνεται η αναγκαιότητα χρήσης της θωράκισης; Είναι επαρκές το πάχος της;

11. Συγκρίνετε το λόγο των ρυθμών δόσης σε απόσταση ~ 1 m από τις πηγές με το λόγο των ρευμάτων κόρου στο βήμα 4. Γιατί διαφέρουν; Εξηγήστε ποιοτικά.
12. Χρησιμοποιώντας το φορητό ανιχνευτή GM χαρτογραφήστε το χώρο του εργαστηρίου και το χώρο φύλαξης των πηγών, σημειώνοντας τα σημεία υψηλού ρυθμού μετρήσεων (c/s). Στα σημεία αυτά πάρτε μετρήσεις του στιγμιαίου ρυθμού δόσης με το φορητό θάλαμο ιονισμού ή το όργανο μέτρησης ραδιορύπανση. Πώς επηρεάζει τις μετρήσεις σας η β-ακτινοβολία των πηγών; Συμβαδίζουν οι μετρήσεις σας με τα όρια για επαγγελματικά εκτιθέμενους και σπουδαστές εμπλεκόμενους με χρήση ιονιζουσών ακτινοβολιών; Ποια μέτρα ακτινοπροστασίας λαμβάνονται;
13. Από τα στοιχεία της άσκησης, τις πηγές που χρησιμοποιούνται στο εργαστήριο και τον τρόπο που τις χειρίζεστε, να κάνετε μια εκτίμηση για τη συνολική δόση που θα δεχτείτε κατά τη διάρκεια όλων των εργαστηριακών ασκήσεων. Να σχολιαστεί το αποτέλεσμα και να αναφερθούν συνοπτικά τα μέτρα ακτινοπροστασίας (θυμηθείτε τις βασικές αρχές) που πρέπει να παίρνει ο φοιτητής από τη στιγμή που παραλαβαίνει την πηγή και μέχρι το τέλος της άσκησης.

Πριν φύγετε από το χώρο του εργαστηρίου βεβαιωθείτε ότι όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν στο χώρο του εργαστηρίου έχουν αποθηκευτεί στον ενδεδειγμένο χώρο με την κατάλληλη θωράκιση χρησιμοποιώντας τον ανιχνευτή ραδιομόλυνσης (φορητός μετρητής Geiger Mueller και όργανο με κρύσταλλο NaI).

Φορητός Θάλαμος Ιονισμού Victoreen 451P

- Γενική περιγραφή μονάδας

Η μονάδα Victoreen 451P είναι ένα φορητό όργανο ανίχνευσης ακτινοβολίας και μέτρησης δόσης με θάλαμο ιονισμού υψηλής πίεσης υψηλής ευαισθησίας. Ο θάλαμος έχει βαθμονομηθεί σε ισοδύναμη δόση (Sv) για ακτινοβολία γ και X σε ενέργειες από 20 keV μέχρι 2 MeV. Το όργανο ανταποκρίνεται και σε ακτινοβολία β άνω του 1 MeV, αλλά δεν είναι βαθμονομημένο για δόση.

Η τάση λειτουργίας του θαλάμου είναι περίπου 105 V, την οποία παρέχουν 5 μπαταρίες λιθίου, ενώ χρησιμοποιούνται δύο μπαταρίες 9 V για τη λειτουργία των ηλεκτρονικών του οργάνου. Είναι δυνατή η ταυτόχρονη καταγραφή του ρυθμού δόσης και του ολοκληρώματος δόσης, ενώ μπορεί να καταγράφεται ο μέγιστος ρυθμός δόσης.



Στην οθόνη του οργάνου παρουσιάζεται ψηφιακή ένδειξη άμεσης ανάγνωσης του ρυθμού ισοδύναμης δόσης, καθώς και διάγραμμα μπάρας, το οποίο λειτουργεί ως «αναλογικός» δείκτης άμεσου αναγνώσεως. Το εύρος δόσεων που παρουσιάζεται στην οθόνη του οργάνου αλλάζει αυτόματα ανάλογα με το πεδίο ακτινοβολίας, ενώ η ακρίβεια της μίας ή της άλλης ένδειξης είναι διαφορετική σε κάθε περιοχή ρυθμών δόσης. Το όργανο παρουσιάζει μια ελαφρά υστέρηση κατά τη μετάβαση από το ένα εύρος ρυθμών δόσης στο άλλο, έτσι ώστε κατά τις μετρήσεις στο μεταίχμιο δύο περιοχών να μην παρουσιάζονται συνεχείς εναλλαγές εύρους.

- Χαρακτηριστικά μονάδας

- ✓ **Ανιχνεύσιμη ακτινοβολία (ελάχιστη ενέργεια):** $\beta > 1 \text{ MeV}$, $\gamma > 25 \text{ keV}$.
- ✓ **Χρόνοι απόκρισης και εύρη λειτουργίας**

εύρος λειτουργίας	χρόνος απόκρισης
0 $\mu\text{Sv/h}$ – 5 $\mu\text{Sv/h}$	5 s
0 $\mu\text{Sv/h}$ – 50 Sv/h	2 s
0 $\mu\text{Sv/h}$ – 500 $\mu\text{Sv/h}$	1.8 s
0 mSv/h – 5 mSv/h	1.8 s
0 mSv/h – 50 mSv/h	1.8 s

- ✓ **Ακρίβεια:** $\pm 10\%$ της εκάστοτε ένδειξης μεταξύ 10%-100% της συνολικής κλίμακας σε κάθε εύρος λειτουργίας, ανεξάρτητα της ενεργειακής απόκρισης.

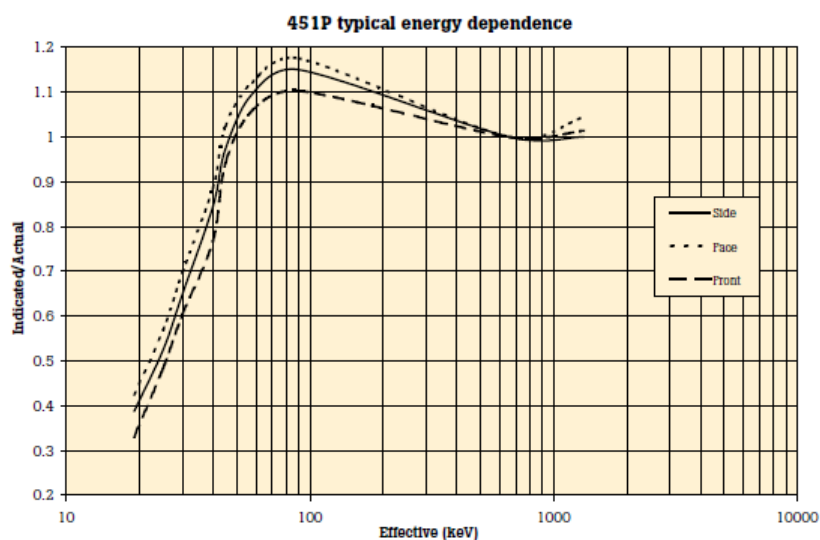
- ✓ **Επαναληψιμότητα:** εντός 5% της ένδειξης.

- ✓ **Ανιχνευτής:** θάλαμος όγκου 230 cm^3 με αέρα σε πίεση 6 atm. Πλαστικό τοίχωμα (phenolic) πάχους 200 mg/cm^2

- ✓ **Χρόνος προθέρμανσης για αξιόπιστη λειτουργία:** κάτω από ένα λεπτό για αρχική λειτουργία, εφόσον το όργανο βρίσκεται σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον λειτουργίας. Περί τα 4 min για ενδείξεις κάτω από 0,2 $\mu\text{Sv/h}$ σε περιοχές με υπόβαθρο της τάξης των 0,1 $\mu\text{Sv/h}$ ή χαμηλότερο.

- ✓ **Ενεργειακή εξάρτηση:** όπως παρουσιάζεται στο διπλανό διάγραμμα.

- ✓ **Καταστάσεις λειτουργίας:** ολοκληρωτική δόση, ρυθμός δόσης, μέγιστος ρυθμός (freeze mode). Η κατάσταση μέτρησης ολοκληρωτικής δόσης τίθεται σε συνεχή λειτουργία 30 s μετά την εκκίνηση της μονάδας. Οι δύο πρώτες καταστάσεις εναλλάσσονται με το πλήκτρο **MODE**, ενώ η μονάδα εισέρχεται στην τρίτη (freeze) κρατώντας πιεσμένο το πλήκτρο **MODE**.



Canberra MCB2: Φορητός ανιχνευτής ραδιομόλυνσης α, β και γ ακτινοβολίας, με θάλαμο Geiger-Mueller

- Γενική περιγραφή μονάδας

Ο μετρητής MCB2 είναι μια φορητή μονάδα ανίχνευσης και εντοπισμού κάθε είδους ραδιομόλυνσης από β-εκπομπούς ενέργειας τουλάχιστον 30 keV, ή α- και γ-εκπομπούς. Χρησιμοποιείται κυρίως για την εκτίμηση της έντασης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από ραδιομολυσμένη επιφάνεια.

Η ανιχνευτική διάταξη είναι θάλαμος Geiger-Mueller με εξαιρετικά λεπτό παράθυρο και προστατευτικό πλέγμα. Στην οθόνη στο πίσω μέρος του ανιχνευτή εμφανίζεται ο καταμετρούμενος ρυθμός σε counts/s (εύρος 0,2 έως 9999 c/s) ενώ εκπέμπεται ήχος χαρακτηριστικού ρυθμού και έντασης ανάλογα με τον καταμετρούμενο ρυθμό.

- Χαρακτηριστικά ανιχνευτή

- ✓ Παράθυρο ανιχνευτή: Mica (πάχος: 1,8 έως 2 mg/cm²)
- ✓ Εμβαδό παραθύρου ανιχνευτή: 15,5 cm²
- ✓ Μεταλλικό προστατευτικό πλέγμα με 78% διαφάνεια
- ✓ Μεταλλικό προστατευτικό φύλλο για διαχωρισμό αποτελεσμάτων προερχόμενων από α και β σωματία από αυτά γ ακτινοβολίας
- ✓ Θόρυβος υποβάθρου: 0,8 c/s σε περιβάλλον με δόση υποβάθρου 0,1 μGy/h
- ✓ Απόδοση με πηγές σε επαφή

Ακτινοβολία	Ραδιονουκλίδιο	Απόδοση σε γεωμετρία 2π
α	²⁴¹ Am	32,5 %
α	²³⁹ Pu	20 %
β	³⁶ Cl	51,6 %
β/γ	⁶⁰ Co	34,1%
β	⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	48 %
μαλακή β	¹⁴ C	18,8 %

- ✓ Ευαισθησία σε ακτινοβολία γ: 58 c/s στα 10 μSv/h (¹³⁷Cs)



- Περιγραφή λειτουργίας μονάδας

Διακόπτης
ενεργοποίησης/απενεργοποίησης.
Κρατήστε πιεσμένο για
ενεργοποίηση/απενεργοποίηση.



LCD Οθόνη
μετρήσεων counts/s

Διακόπτης οπίσθιου φωτισμού.
Πιέζοντας συνεχώς για 3 s
απενεργοποιείται το beeper.

ΠΡΟΣΟΧΗ! Ο θάλαμος του ανιχνευτή είναι πολύ εύθραυστος. Κάθε επαφή με το παράθυρο του ανιχνευτή είναι πολύ πιθανό να καταστρέψει το θάλαμο. Το μεταλλικό πλέγμα επάνω στον ανιχνευτή προστατεύει το παράθυρό του.

Να τοποθετείται πάντοτε το μεταλλικό προστατευτικό στον ανιχνευτή για προστασία του εκτός και αν θέλετε να διαχωρίσετε μετρήσεις α και β σωματίων από μετρήσεις ακτινοβολίας γ.

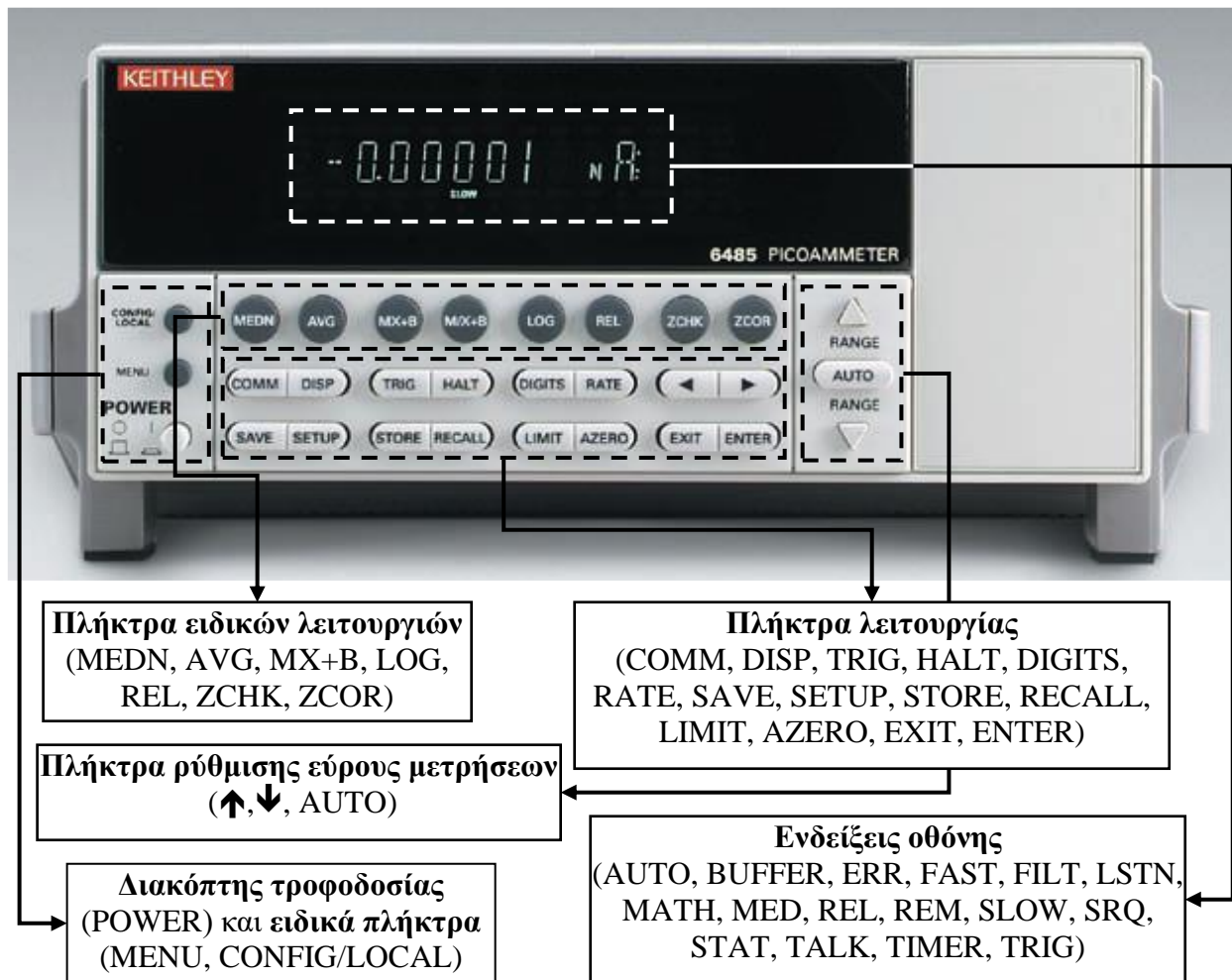
Πικοαμπερόμετρο Keithley 6485

- Γενική περιγραφή μονάδας

Η μονάδα Keithley 6485 είναι ένα πικοαμπερόμετρο υψηλής απόδοσης ικανό να μετρήσει ρεύματα από 20 fA έως 20 mA, καταγράφοντας τιμές με ταχύτητα μέχρι 1000 μετρήσεις ανά second. Ο σχεδιασμός του επιτρέπει τη μέτρηση πολύ χαμηλών τιμών ρευμάτων με ευαισθησία κοντά σε αυτή ενός ηλεκτρομέτρου, ενώ παρέχει την ευκολία χρήσης ενός ψηφιακού πολυμέτρου.

- Περιγραφή λειτουργιών μονάδας

Τα πλήκτρα στην πρόσοψη και οι λειτουργίες τους καθώς και οι ενδείξεις της ψηφιακής οθόνης του οργάνου παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



- Χρήση μονάδας ηλεκτρομέτρου για τη μέτρηση ρεύματος θαλάμου ιονισμού

Η μονάδα ανοίγει πιέζοντας το διακόπτη **POWER**. Όταν η μονάδα ανοίξει εκτελείται μια ακολουθία αυτοελέγχου όλων των μονάδων του οργάνου και στο τέλος φορτώνεται η ομάδα ρυθμίσεων **USR1** (User Setup #1) που έχει καθοριστεί για την μέτρηση του ρεύματος του θαλάμου ιονισμού. Το πικοαμπερόμετρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα λεπτό αφού τεθεί σε λειτουργία, αλλά για να επιτευχθεί αξιοπιστία των μετρήσεων θα πρέπει να αφεθεί επαρκής χρόνος ώστε να έρθει σε θερμοκρασία λειτουργίας και να σταθεροποιηθεί η λειτουργία του (~ 15 min).

Για να ξεκινήσει να παίρνει μετρήσεις το όργανο πρέπει να πιεστεί το **ZCHK** για να απενεργοποιηθεί η κατάσταση zero check.

Μεταξύ διαφορετικών μετρήσεων το πικοαμπερόμετρο θα πρέπει να τίθεται σε κατάσταση αδρανείας πιέζοντας το **HALT**, οπότε και στην οθόνη παγώνει η μέτρηση ή παύλες την

αντικαθιστούν (-.----- nA). Για την ενεργοποίηση της συσκευής και τη λήψη της επόμενης μέτρησης πιέζεται το **TRIG** οπότε και η οθόνη αλλάζει και πάλι δίνοντας την εκάστοτε μετρούμενη τιμή. **ΠΡΟΣΟΧΗ!** Η διαδικασία θέσης σε αδράνεια πιέζοντας το **HALT** και επαναφοράς για νέα μέτρηση πιέζοντας το **TRIG** είναι απαραίτητες κατά τη μεταβολή της τάσης, διότι σε άλλη περίπτωση θα παίρνουμε λανθασμένες τιμές λόγω της χρήσης του ψηφιακού φίλτρου, το οποίο δίνει μέση τιμή από μια σειρά πολλών «στιγμιαίων» μετρήσεων.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί ώστε να μην τσακιστούν και να μην κινούνται τα καλώδια σύνδεσης του πικοαμπερομέτρου με το θάλαμο ιονισμού, διότι εμφανίζονται φορτία και ρεύματα λόγω τριβοηλεκτρικών και πιεζοηλεκτρικών φαινομένων καθώς και λόγω επαγωγής από κίνηση αγωγών ρεύματος εντός μαγνητικού πεδίου. Υπενθυμίζεται ότι τα μετρούμενα φορτία είναι εξαιρετικά μικρά, της τάξης των 10^{-5} nA, οπότε τα απειροελάχιστα φορτία ή ρεύματα που προκύπτουν από λανθασμένους χειρισμούς αλλοιώνουν και καταστρέφουν τις μετρήσεις.

- Ρυθμίσεις μονάδας πικοαμπερομέτρου

✓ Σε περίπτωση που έχει επιλεγεί άλλη ομάδα ρυθμίσεων από την προκαθορισμένη για μετρήσεις με το θάλαμο ιονισμού **USR1**, η επαναφορά της ομάδας ρυθμίσεων γίνεται ως εξής:

1. Πιέζοντας το **SETUP** από τα πλήκτρα λειτουργίας της μονάδας εμφανίζεται το μενού αποκατάστασης ρυθμίσεων.
2. Χρησιμοποιώντας το πλήκτρο **↑** ή **↓** θα εμφανιστεί η επιθυμητή ομάδα ρυθμίσεων (**USR1**).
3. Πιέζοντας **ENTER** επιλέγεται η ομάδα ρυθμίσεων **USR1**.

✓ Εάν έχουν χαθεί οι ρυθμίσεις της ομάδας **USR1** θα πρέπει να αποθηκευτούν ξανά στην ομάδα ρυθμίσεων **USR1**. Η διαδικασία γίνεται ως εξής:

1. Πιέζοντας διαδοχικά το πλήκτρο **↓** (**RANGE Down**) αλλάζει το εύρος απεικόνισης των μετρήσεων μέχρι η οθόνη να δείξει **0.0000 nA** (δυνατότητα μέτρησης ρεύματος της τάξης των 10⁻⁵ nA).
2. Πιέζοντας το **RATE** από τα πλήκτρα λειτουργίας της μονάδας επιλέγεται η κατάσταση **SLOW**, η οποία και εμφανίζεται σαν ένδειξη στο κάτω μέρος της οθόνης. Με αυτό τον τρόπο επιλέγεται ο μεγαλύτερος χρόνος μέτρησης του σήματος, έτσι ώστε να έχουμε σήμα με το λιγότερο δυνατό θόρυβο.
3. Πιέζοντας το **AVG** από τα πλήκτρα ειδικών λειτουργιών της μονάδας τίθεται ψηφιακό φίλτρο για σταθεροποίηση των τιμών κατά τη διάρκεια της μέτρησης και εμφανίζεται η ένδειξη **FILT** στο κάτω μέρος της οθόνης.
4. Πιέζοντας το **AZERO** από τα πλήκτρα λειτουργίας της μονάδας επιλέγεται η κατάσταση **AUTOZERO ON**, η οποία ενεργοποιεί εσωτερικούς αλγορίθμους που σε τακτά χρονικά διαστήματα ελέγχουν και διορθώνουν την ενίσχυση και την μηδενική τιμή, που μπορεί να μεταβάλλονται με το χρόνο.
5. Πιέζοντας το πλήκτρο **SAVE** από τα πλήκτρα λειτουργίας της μονάδας αποκτάται πρόσβαση στο μενού αποθήκευσης ρυθμίσεων.
6. Χρησιμοποιώντας τα πλήκτρα **↑** ή **↓** επιλέγεται η επιθυμητή ομάδα αποθήκευσης ρυθμίσεων (1→**USR1**).
7. Πιέζοντας το **ENTER** οι ρυθμίσεις αποθηκεύονται.

✓ Εάν δεν φορτώνεται κατά την εκκίνηση της μονάδας η ομάδα ρυθμίσεων **USR1**, θα πρέπει να τεθεί ως προκαθορισμένη επιλογή, ως εξής:

1. Πιέζοντας το **CONFIG** από τα ειδικά πλήκτρα και στη συνέχεια το **SETUP** από τα πλήκτρα λειτουργίας εμφανίζεται το μενού εκκίνησης της μονάδας (power-on menu).
2. Χρησιμοποιώντας τα πλήκτρα **↑** ή **↓** εμφανίζεται η επιθυμητή ομάδα ρυθμίσεων (**USR1**).
3. Πιέζοντας το **ENTER** από τα πλήκτρα λειτουργίας αποθηκεύεται ως προκαθορισμένη κατά την εκκίνηση της μονάδας η ομάδα ρυθμίσεων **USR1**.