

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



**ΚΟΛΛΑΣ ΙΩΑΝΝΗΣ
ΤΣΑΛΙΚΗΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ :Δρ. ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ ΠΟΛΥΖΑΚΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2018

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και αφορά τις Εφαρμογές της Πυρηνικής Ενέργειας: Απεμπλουτισμένο ουράνιο, ανίγνευση ακτινοβολιών, στρατιωτική αποτροπή, προσδιορισμός ραδιενεργών συγκεντρώσεων και ενεργοτήτων, τις εφαρμογές των ραδιοϊσοτόπων στη γεωλογία, καθώς και τις εφαρμογές της Πυρηνικής Ιατρικής.

Ευχαριστούμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μας Δρ. Απόστολος Πολυζάκης (Μηχανολόγος Μηχανικός, Φυσικός PhD, Msc, MBA) για την πολύτιμη βοήθειά του και τις χρήσιμες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια υλοποίησης της πτυχιακής μας.

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά την οικογένειά μας που στάθηκαν δίπλα μας δίνοντας υπομονή και μας στήριξαν καθ' όλη την διάρκεια φοίτησής μας, διότι χωρίς αυτούς δεν θα είχαμε καταφέρει να φτάσουμε ως εδώ.

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστών: Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Οι σπουδαστές

Ιωάννης Κόλλας

.....

(Υπογραφή)

Θεόδωρος Τσαλίκης

.....

(Υπογραφή)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της Πτυχιακής Εργασίας είναι η κατανόηση της Πυρηνικής φυσικής- Πυρηνική Τεχνολογία που ενσωματώνει την επιστήμη της φυσικής και της χημείας (απεμπλουτισμένο ουράνιο, ανίχνευση πυρηνικών ακτινοβολιών, στρατιωτική αποτροπή(πυρηνικά όπλα-τεχνικά στοιχεία Πυρηνικών όπλων, η περίπτωση της Β. Κορέας) και την Πυρηνική ιατρική η οποία αποτελεί την σύγχρονη ιατρική και είναι σημαντική για την αντιμετώπιση μιας νόσου στον άνθρωπο.

Αρχικά δίνονται στοιχεία για το άτομο και η δομή του. Γενικά η ύλη αποτελείται από άτομα. Κάθε άτομο αποτελείται από ένα θετικά φορτισμένο πυρήνα, στον οποίο συγκεντρώνεται πρακτικά όλη η μάζα του ατόμου και από ηλεκτρόνια που κινούνται γύρω από τον πυρήνα. Θα δούμε από ποια στοιχεία αποτελείται ο πυρήνας του ατόμου. Επίσης παρακάτω θα μελετήσουμε τον χάρτη του Segre ή χάρτης των πυρήνων(πρόκειται για ένα διάγραμμα στο οποίο αποτυπώνονται οι θέσεις στο δισδιάστατο χώρο (Z,N) των διαφόρων γνωστών πυρήνων συναρτήσει του ατομικού (Z) και του νετρονικού τους (N) αριθμούς, καθώς και των χάρτη των νουκλιδίων. Θα δούμε το έλλειμα μάζας- ενέργεια σύνδεσης που έχει να κάνει με την μάζα του πυρήνα, και τέλος τις πυρηνικές δυνάμεις που εξασκούνται μέσα στον πυρήνα, και την ραδιενέργεια η διαφορετικά διέγερση ηλεκτρονίων. Στην συνέχεια δίνεται το τι είναι το απεμπλουτισμένο ουράνιο, ποια τα επίπεδά του ουρανίου στο περιβάλλον, αν ο άνθρωπος εκτίθεται σε φυσικό ουράνιο ή όχι, και ποιες είναι οι στρατιωτικές χρήσεις του απεμπλουτισμένου ουρανίου, και τι είναι αυτές οι προσμίξεις που αναφέρονται στο απεμπλουτισμένο ουράνιο, καθώς και πώς επηρεάζει τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Επίσης θα δούμε τι είναι το κύριο άρμα μάχης AMRAMS M1, και γιατί χρησιμοποιείται, είναι συνοπτικά ερωτήματα που θα απαντηθούν στο παρακάτω κεφάλαιο.

Ακολουθούν τα διάφορα είδη ακτινοβολιών που μέχρι σήμερα έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί θα δούμε ότι δεν ανιχνεύουν μόνο τις πυρηνικές ακτινοβολίες άλφα, βήτα και γάμα αλλά και άλλα είδη ακτινοβολιών όπως ακτινοβολίες βαρέων ιονιστικών σωματιδίων. Επίσης θα διαπιστώσουμε ότι η μορφή και το μέγεθος των ανιχνευτών εξαρτάται κύρια από την γεωμετρία και οι απαριθμητές: θάλαμος ιονισμού, αναλογικός απαριθμητής ,απαριθμητής Geiger-Muller, και διάφορα άλλα είδη απαριθμητών που θα αναφερθούν στο συγκεκριμένο κεφάλαιο. Στην συνέχεια γίνεται ο προσδιορισμός ραδιενεργών συγκεντρώσεων και ενεργοτήτων με ενεργοποίηση νετρονίων. Προσδιορισμός του Ουρανίου με την μέθοδο των καθυστερημένων νετρονίων. Προσδιορισμός συγκέντρωσης του ουρανίου σε ορυκτά με τη μέθοδο εγγραφής ιχνών σχάσης. Μέθοδος ανάλυσης φθορισμού με ακτίνες $-X$. Ακολουθεί η σημασία της ραδιοχρονολόγησης πέμπτο κεφάλαιο που μέσα σε αυτήν είναι διάφορα στοιχεία που την χαρακτηρίζουν με την ταξινόμηση των μεθόδων των ραδιοχρονολογήσεων. Ακόμα θα ασχοληθούμε με την μέθοδο εγγραφής ιχνών σχάσης και την μέθοδο θερμοφωταύγειας αναλύοντάς τες με διαγράμματα και στοιχεία τα οποία μας βοηθούν στην κατανόησή τους. Έπειτα περιγράφονται οι εφαρμογές των ραδιοϊσοτόπων στη γεωλογία, στο κεφάλαιο έκτο, τι είναι αυτές και από τι αποτελούνται.

Στην συνέχεια περιγράφεται η αφετηρία των βιολογικών επιπτώσεων των ακτινοβολιών. Η ακτινοβολία εναποθέτει ενέργεια στο υλικό, με αποτέλεσμα τον ιονισμό του υλικού. Είναι ακριβώς αυτή η εναπόθεση ενέργειας, ο ιονισμός των μορίων των κυττάρων που αποτελεί την αφετηρία των βιολογικών επιπτώσεων των ραδιενεργών ακτινοβολιών σε

ζωντανούς οργανισμούς. Για την κατανόηση των βιολογικών επιπτώσεων θα δοθεί εδώ στοιχειώδεις περιγραφή της δομής και λειτουργίας του κυττάρου, καθώς και σε ποιες κατηγορίες διακρίνονται καθένα από αυτά. Παρακάτω θα γίνει αναφορά στις πρωτεΐνες, τα νουκλεϊκά οξέα η διαφορετικά νουκλεοτίδια που το σπουδαιότερο από αυτά είναι το DNA. Ακόμα θα δούμε τις δόσεις ραδιενέργειας, την ραδιενέργεια περιβάλλοντος που αυτή χωρίζεται σε κατηγορίες που θα αναφερθούν παρακάτω. Θα αναφέρουμε τις βιολογικές επιπτώσεις που και αυτές χωρίζονται σε κατηγορίες, τα όρια δόσεων και τέλος το πρόβλημα της θωράκισης, Έπειτα ακολουθούν, οι κατηγορίες ραδιενεργών καταλοίπων και σε ποιες κατηγορίες αυτά διακρίνονται, με κριτήρια την ποσότητα και το είδος της ραδιενέργειας, καθώς και τους αναμενόμενους χρόνους επιβίωσης των ραδιενεργών ισοτόπων. Στην συνέχεια θα δούμε την βραχυπρόθεσμη και μεσοπρόθεσμη διαχείριση των πυρηνικών καταλοίπων, και την μακροπρόθεσμη διαχείριση.

Στην συνέχεια θα τονισθεί ο σημαντικός ρόλος της Πυρηνικής Ιατρικής που είναι μια νέα σχετικά ειδικότητα η οποία έχει σαν σκοπό την εφαρμογή των ιδιοτήτων των ραδιοισοτόπων στη διάγνωση και την θεραπεία των ανθρώπινων ασθενειών και μελετά την ασταθή ισότοπα σε συνδυασμό με την ανάπτυξη των συστημάτων ανίχνευσης της εκπεμπόμενης από ραδιοϊσότοπα ακτινοβολίας. Οι ιατρικές εξετάσεις οι οποίες γίνονται στην Πυρηνική Ιατρική είναι γνωστές ως σπινθηρογραφήματα. Ο κλάδος αυτός της ιατρικής ενσωματώνει βασικές γνώσεις και από άλλες επιστήμες όπως τη φυσική ,τη χημεία ,την ραδιοχημεία, ραδιοφάρμακα και ραδιοϊσότοπα, ενώ παρουσιάζονται τα μηχανήματα που αποτελούν βασικό κορμό της Πυρηνικής Ιατρικής, όπως είναι η γ-camera, ο κρύσταλλος, οι φωτοπολλαπλασιαστές, τα μηχανήματα PET και SPECT που θα τα δούμε αναλυτικά το καθένα στο συγκεκριμένο κεφάλαιο.

Η στρατιωτική αποτροπή είναι αυτή που παρουσιάζεται έπειτα, καθώς και την περίπτωση της Βόρειας Κορέας που δείχνει δυνατή και έτοιμη για έναν ενδεχόμενο Πυρηνικό Πόλεμο, και αυτό θέτει σε κίνδυνο το περιβάλλον καθώς και την ανθρώπινη ύπαρξη. Ποιο αναλυτικά, η θεωρία της πυρηνικής αποτροπής και οι στρατηγικές μελέτες γενικότερα υπάρχουν, διασυνδέονται και αφορούν τη χρήση στρατηγικών οπλικών συστημάτων. Είναι απαραίτητο λοιπόν να παρουσιασθούν αυτά τα οπλικά συστήματα, έτσι ώστε ο αναγνώστης να μπορέσει να αντιληφθεί τον ρόλο τους στη διαμόρφωση της αποτροπής αλλά και την αποστολή τους σύμφωνα με τη θεωρία της αποτροπής.

Τα συμπεράσματα της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας θα περιλαμβάνει το εικοστό κεφάλαιο, με χρήσιμα αποτελέσματα της εφαρμογής Πυρηνικής Τεχνολογίας και της Πυρηνικής Ιατρικής, καθώς θα επισημάνουμε και θα τονίσουμε συγκεκριμένες κατηγορίες έτσι ώστε να γίνει κατανοητό πόσο σημαντικές είναι αυτές για τον άνθρωπο και γενικά για το περιβάλλον.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	ii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	iv
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΤΟ ΑΤΟΜΟ ΚΑΙ Η ΔΟΜΗ ΤΟΥ	1
ΠΥΡΗΝΑΣ ΤΟΥ ΑΤΟΜΟΥ	6
ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ	19
1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΑΠΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΕΝΟ ΟΥΡΑΝΙΟ	23
1.1. ΟΥΡΑΝΙΟ.....	23
1.2. ΕΠΙΠΕΔΑ ΤΟΥ ΟΥΡΑΝΙΟ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	24
1.3. ΑΠΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΕΝΟ ΟΥΡΑΝΙΟ (DEPLETED URANIUM,DU).....	25
1.4. ΑΠΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΕΝΟ ΟΥΡΑΝΙΟ VS ΦΥΣΙΚΟ ΟΥΡΑΝΙΟ (ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ)	26
1.5. ΈΚΘΕΣΗ ΑΝΘΡΩΠΟΥ ΣΕ ΦΥΣΙΚΟ ΟΥΡΑΝΙΟ.....	26
1.6. ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΑΠΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΕΝΟΥ ΟΥΡΑΝΙΟΥ	26
1.7. ΠΡΟΣΜΙΞΕΙΣ ΣΤΟ ΑΠΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΕΝΟ ΟΥΡΑΝΙΟ	27
1.8. ΜΕΛΕΤΕΣ ΣΕ ΑΝΘΡΩΠΟΥΣ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΕΚΤΕΘΕΙ ΣΕ ΟΥΡΑΝΙΟ Η ΑΠΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΕΝΟ ΟΥΡΑΝΙΟ	27
1.9. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΟΥΡΑΝΙΟ ΣΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΣΩΜΑ.....	28
1.10. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ ΑΠΟ ΟΥΡΑΝΙΟ ΚΑΙ ΑΠΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΕΝΟ ΟΥΡΑΝΙΟ	29
1.11. ΣΥΝΔΕΣΗ ΟΥΡΑΝΙΟ Η ΤΟ ΑΠΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΕΝΟ ΟΥΡΑΝΙΟ ΜΕ ΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΚΑΡΚΙΝΟ.....	29
1.12. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΟΥΡΑΝΙΟΥ ΣΤΑ ΠΑΙΔΙΑ.....	30
1.13. ΠΙΘΑΝΟΙ ΤΡΟΠΟΙ ΕΚΘΕΣΗΣ ΑΠΟ ΒΛΗΜΑΤΑ ΑΠΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΕΝΟΥ ΟΥΡΑΝΙΟΥ.....	30
1.14. ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΑΠΟ ΤΟ ΧΕΙΡΙΣΜΟ ΒΛΗΜΑΤΩΝ ΑΠΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΕΝΟΥ ΟΥΡΑΝΙΟΥ.....	32
1.15. ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΑΠΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΕΝΟΥ ΟΥΡΑΝΙΟΥ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	32
1.16. ΚΥΡΙΟ ΑΡΜΑ ΜΑΧΗΣ AMRAMSM1	33
1.16.1. Εξοπλισμός M1A1	34
1.16.2. Κινητήρας M1A1	36
1.16.3. Συμπεράσματα.....	36
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ.....	38
2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	38
2.2. ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ GEIGER-MULLER	38
2.3. ΑΠΑΡΙΘΜΗΤΗΣ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΜΩΝ (SCINTILLATION DETECTOR)	39
2.4. ΑΠΑΡΙΘΜΗΤΕΣ Ge , Ge-Li ΚΑΙ Si-Li	42
2.5. ΠΛΑΣΤΙΚΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΙΧΝΩΝ (NUCLEAR TRACK DETECTORS)	42
2.6. ΑΠΑΡΙΘΜΗΤΕΣ ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑΣ	43
2.7. ΑΠΑΡΙΘΜΗΤΗΣ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ BF ₃	43

2.8.	ΦΟΡΗΤΑ ΟΡΓΑΝΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ (SURVEYMETERS)	44
2.9.	ΔΟΣΙΜΕΤΡΑ	45
3.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΩ.....	46
3.1.	ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΝΕΤΡΟΝΙΑ	46
3.2.	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΟΥΡΑΝΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ «ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΜΕΝΩΝ» ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ	49
3.3.	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΟΥΡΑΝΙΟΥ ΣΕ ΟΡΥΚΤΑ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΕΓΓΡΑΦΗΣ ΙΧΝΩΝ ΣΧΑΣΗΣ.....	49
3.4.	ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ ΜΕ ΑΚΤΙΝΕΣ-Χ.....	50
4.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΡΑΔΙΟΧΡΟΝΟΛΟΓΗΣΕΙΣ.....	51
4.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	51
4.2.	ΗΛΙΚΙΑ ΤΗΣ ΥΛΗΣ.....	52
4.3.	ΓΕΝΙΚΗ ΑΡΧΗ ΤΩΝ ΡΑΔΙΟΧΡΟΝΟΛΟΓΗΣΕΩΝ	53
4.4.	ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΤΩΝ ΡΑΔΙΟΧΡΟΝΟΛΟΓΗΣΕΩΝ.....	55
4.5.	ΜΕΘΟΔΟΣ ΗΛΙΟΥ	55
4.6.	ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΟΛΥΒΔΟΥ	56
4.7.	ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΛΙΟΥ-ΑΡΓΟΥ.....	57
4.8.	ΜΕΘΟΔΟΣ ΡΟΥΒΙΔΙΟΥ-ΣΤΡΟΝΤΙΟΥ	58
4.9.	ΜΕΘΟΔΟΣ ΡΕΝΙΟΥ-ΟΣΜΙΟΥ	59
4.10.	ΜΕΘΟΔΟΣ ΛΟΥΤΕΤΣΙΟΥ-ΧΑΦΝΙΟΥ.....	59
4.11.	ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΡΙΤΙΟΥ-ΑΝΘΡΑΚΑ (TRICARB).....	60
4.12.	ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΓΓΡΑΦΗΣ ΙΧΝΩΝ ΣΧΑΣΗΣ	64
4.13.	ΜΕΘΟΔΟΣ ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑΣ.....	64
4.13.1.	Εισαγωγή στο φαινόμενο της θερμοφωταύγειας.....	64
4.13.2.	Χαρακτηριστικά Θερμοφωταύγειας.....	66
4.14.	ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΠΙΝ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟΥ (ESR)	71
5.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΡΑΔΙΟΙΣΟΤΟΠΩΝ ΣΤΗΝ ΓΕΩΛΟΓΙΑ.....	74
5.1.	ΈΡΕΥΝΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΕΥΡΕΣΗ ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΟΡΥΚΤΩΝ	74
5.2.	ΙΧΝΗΘΕΤΕΣ	75
5.3.	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΛΑΙΟΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΜΕ 180.....	76
5.4.	ΤΟ ΡΑΔΟΝΙΟ ΣΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ	77
6.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΑΦΕΤΗΡΙΑ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	79
6.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	79
6.2.	ΔΟΣΕΙΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	82
6.3.	ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ.....	86
6.4.	ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ	91
6.5.	ΌΡΙΑ ΔΟΣΕΩΝ	94
6.6.	ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ	97
7.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΩΝ ΚΑΤΑΛΟΙΠΩΝ	105
7.1.	ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΩΝ ΚΑΤΑΛΟΙΠΩΝ.....	105
7.2.	ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΗ ΚΑΙ ΜΕΣΟΠΡΟΘΕΣΜΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΚΑΤΑΛΟΙΠΩΝ.....	106
7.3.	ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ	108
8.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΤΟΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ.....	112
8.1.	ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΥΛΗΣ.....	112
8.2.	ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΕΙΚΟΝΑ	113
8.3.	ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΑΝΤΙΛΗΨΕΙΣ	113

8.4.	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	115
8.5.	ΕΛΛΕΙΜΜΑ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ.....	116
8.6.	ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΦΟΡΤΙΣΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	116
8.7.	ΔΙΕΓΕΡΣΗ-ΑΠΟΔΙΕΓΕΡΣΗ.....	116
8.8.	ΙΟΝΤΙΣΜΟΣ.....	117
8.9.	ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ «ΕΚ ΠΕΔΗΣΕΩΣ»	117
8.10.	ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΑΦΟΡΤΙΣΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.....	117
8.11.	ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΥΛΗ.....	117
8.12.	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΚΕΔΑΣΗ Η ΣΚΕΔΑΣΗ RAYLEIGH.....	117
8.13.	ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΚΕΔΑΣΗ Η ΣΚΕΔΑΣΗ COMPTON Η ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ COMPTON	118
8.14.	ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ Η ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ... ..	118
8.15.	ΔΙΔΥΜΗ ΓΕΝΕΣΗ.....	118
8.16.	ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	119
8.17.	ΜΕΓΕΘΗ ΣΤΗ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΟ ΔΙΑΣΠΑΣΗ	119
8.18.	ΧΡΟΝΟΣ ΥΠΟΔΠΛΑΣΙΑΣΜΟΥ Η ΧΡΟΝΟΣ ΗΜΙΣΕΙΑΣ ΖΩΗΣ	120
8.19.	ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΟΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	120
8.20.	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΩΝ	122
8.21.	ΚΥΚΛΟΤΡΟΝΙΟ.....	122
8.22.	ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΑ ΠΟΥ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΙ ΣΕ ΚΥΚΛΟΤΡΟΝΙΟ	122
8.23.	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΩΝ ΣΕ ΠΥΡΗΝΙΚΟ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ	122
8.24.	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΩΝ ΣΕ ΠΥΡΗΝΙΚΟ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΜΕΣΩ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΣΧΑΣΗΣ.....	123
8.25.	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΩΝ ΣΕ ΠΥΡΗΝΙΚΟ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΜΕΣΩ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΝΕΤΡΟΝΙΑ	123
8.26.	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΩΝ ΣΕ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΩΝ ..	123
8.27.	ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	123
8.28.	ΤΥΠΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ.....	124
9.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΒΙΟΧΗΜΕΙΑ ΚΑΙ ΡΑΔΙΟΧΗΜΕΙΑ.....	125
9.1.	ΟΡΙΣΜΟΙ.....	125
9.2.	ΟΙ ΒΙΟΧΗΜΙΚΟΙ ΔΕΣΜΟΙ.....	125
9.3.	ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΗΣ ΟΥΣΙΩΝ	126
9.4.	ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΩΝ Rf.....	127
9.5.	ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΡΑΔΙΟΕΠΙΣΗΜΑΝΣΗ	127
9.6.	ΤΑ ΒΙΟΜΟΡΙΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΑ RF.....	128
10.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΕΙΔΙΚΟΤΕΡΑ ΘΕΜΑΤΑ ΡΑΔΙΟΒΙΟΛΟΓΙΑΣ, ΡΑΔΙΟΧΗΜΕΙΑΣ. Η ΑΚΤΙΝΙΚΗ ΝΟΣΟΣ	130
10.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	130
10.2.	ΡΑΔΙΟΒΙΟΛΟΓΙΑ – ΡΑΔΙΟΧΗΜΕΙΑ - ΑΚΤΙΝΙΚΗ ΝΟΣΟΣ	130
10.3.	ΙΑΤΡΙΚΕΣ ΕΞΕΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΞΕΤΑΣΕΙΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΙΑΤΡΙΚΗΣ.....	132
10.4.	ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΈΞΥΠΝΗΣ ΚΑΡΤΑΣ	134
10.5.	ΑΚΤΙΝΙΚΗ ΝΟΣΟΣ.....	134
10.5.1.	Τα στάδια της πάθησης	134
10.5.2.	Συμπτώματα και εργαστηριακές εξετάσεις.....	134
10.5.3.	Ακαριαία μορφή θα εμφανίσει τα ως άνω συμπτώματα άμεσα.....	135
10.5.4.	Θεραπεία.....	135
10.5.5.	Προληπτικά, προφυλακτικά, διατροφικά μέτρα	135
11.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΤΕΧΝΗΤΑ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΑ ΝΟΥΚΛΙΔΙΑ	137
11.1.	Η ΣΧΑΣΗ - ΟΙ ΠΥΡΗΝΙΚΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ.....	137

11.2.	ΒΟΜΒΑΡΔΙΣΜΟΣ ΑΠΟ ΝΕΤΡΟΝΙΑ	138
11.3.	ΟΙ ΓΡΑΜΜΙΚΟΙ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΕΣ.....	138
11.4.	ΤΟ ΚΥΚΛΟΤΡΟΝΙΟ	138
11.5.	ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ	139
11.5.1.	Γεννήτρια $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$	139
11.5.2.	Η γεννήτρια $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$	140
11.5.3.	Η γεννήτρια $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	141
11.5.4.	Η γεννήτρια $^{188}\text{W}/^{188}\text{Re}$	142
11.5.5.	Η γεννήτρια $^{113}\text{Sn}/^{113\text{m}}\text{In}$	142
11.5.6.	Η γεννήτρια $^{82}\text{Sr}/^{82}\text{Rb}$	143
12.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΡΑΔΙΟΦΑΡΜΑΚΑ	144
12.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	144
12.2.	ΡΑΔΙΟΦΑΡΜΑΚΑ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΑ.....	144
12.3.	ΡΑΔΙΟΦΑΡΜΑΚΑ ΚΑΙ ΔΙΑΓΝΩΣΗ	145
12.4.	ΦΑΡΜΑΚΟΚΙΝΗΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΦΑΡΜΑΚΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	145
12.5.	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΦΥΛΑΞΕΙΣ	145
12.6.	ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΑ-ΡΑΔΙΟΦΑΡΜΑΚΑ-ΙΧΝΗΘΕΤΕΣ.....	146
12.7.	ΤΑ ΡΑΔΙΟΦΑΡΜΑΚΑ ΣΤΗ ΘΕΡΑΠΕΥΤΙΚΗ ΑΓΩΓΗ.....	146
12.8.	ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΑ ΝΟΥΚΛΙΔΙΑ ΠΟΥ ΕΝΣΩΜΑΤΩΝΟΝΤΑΙ ΩΣ ΡΑΔΙΟΦΑΡΜΑΚΑ. ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΕΣ ΘΕΡΑΠΕΥΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	147
13.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΕ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΟ ΙΧΝΗΘΕΤΗ. ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	150
13.1.	Η ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΑΡΑΙΩΣΗΣ (ISOTOPE DILUTION PRINCIPLE) ΓΙΑ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ.....	150
13.2.	Η ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΟΛΙΚΟΥ ΑΝΤΑΛΛΑΞΙΜΟΥ ΝΑΤΡΙΟΥ (TOTAL EXCHANGEABLE SODIUM).....	150
13.3.	ΚΙΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ - ΜΕΛΕΤΕΣ ΡΟΗΣ - ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	151
13.4.	ΡΑΔΙΟΑΝΟΣΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΞΕΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ.....	152
14.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ - ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ, ΜΟΝΑΔΕΣ ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ.....	153
14.1.	ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΔΟΣΗ (D)	153
14.2.	ΓΡΑΜΜΙΚΩΣ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ (LET)	153
14.3.	ΣΧΕΤΙΚΗ ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΣ (RBE)	153
14.4.	ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ (WR)	153
14.5.	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΔΟΣΗ (HT, R)	154
14.6.	ΠΑΡΑΓΩΝ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΙΣΤΟΥ (WT)	154
14.7.	ΕΝΕΡΓΟΣ ΔΟΣΗ (E)	155
14.8.	ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΔΟΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	155
14.9.	ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗ ΑΠΟ ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ	156
14.10.	ΚΟΣΜΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	156
14.11.	ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΓΗΣ	157
14.12.	ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗ (ΡΑΔΟΝΙΟ)	158
14.13.	ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗΣ ΑΠΟ ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΛΟΓΩ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ.....	159
14.14.	ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗ ΑΠΟ ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΠΗΓΕΣ	160
14.15.	ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΕΣ ΙΑΤΡΙΚΕΣ ΕΞΕΤΑΣΕΙΣ ΜΕ ΑΚΤΙΝΕΣ Χ.....	160
14.16.	ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΕΣ ΕΞΕΤΑΣΕΙΣ ΜΕ ΡΑΔΙΟΦΑΡΜΑΚΑ.....	161

14.17. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΩΝ ΔΟΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΗΣ ΧΡΗΣΕΩΣ ΤΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ ΣΤΗΝ ΙΑΤΡΙΚΗ.....	161
14.18. ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ-ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ.....	161
14.19. ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ.....	162
14.20. ΈΝΝΟΙΕΣ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ.....	163
14.21. ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ.....	164
14.22. ΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ Η ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΙΣΤΩΝ.....	164
14.23. ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗ ΕΜΒΡΥΩΝ.....	164
14.24. Ο ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΔΟΣΕΩΝ.....	165
14.25. ΌΡΙΑ ΔΟΣΕΩΝ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	165
14.26. ΈΛΕΓΧΟΣ ΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ Η ΤΗΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΙΣΤΩΝ.....	166
15. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	167
15.1. ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ.....	167
15.2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΤΥΧΑΙΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ. ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΚΑΙ ΕΠΑΝΑΛΗΨΙΜΟΤΗΤΑ.....	167
15.3. ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΔΙΑΔΟΧΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	168
15.4. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	170
15.5. ΔΙΑΔΟΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ.....	171
15.6. ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΡΟΥΣΕΩΝ.....	172
15.6.1. Ρυθμός κρούσεων.....	172
15.6.2. Επανάληψη μετρήσεων, σφάλμα στη μέση τιμή.....	173
15.7. ΗΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	173
15.8. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΤΑΞΥ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	174
15.9. ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΙΜΗ ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΑ.....	175
15.10. ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΙΜΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΣΕ ΡΑΔΙΟΑΝΟΣΟΛΟΓΙΚΟΥΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥΣ.....	176
15.11. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΑΓΚΑΙΑ ΧΡΟΝΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ.....	177
15.12. ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΧΡΟΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ.....	178
15.13. ΕΙΔΙΚΕΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΑΣΙΕΣ.....	179
15.13.1. Η δοκιμασία χ^2	179
15.13.2. Η δοκιμασία Student' stets.....	180
15.14. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΙΜΩΝ, ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗ.....	183
15.15. ΈΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΣΥΜΦΩΝΙΑΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΔΥΟ ΜΕΘΟΔΟΥΣ.....	183
15.16. ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΡΟΓΝΩΣΤΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ.....	185
15.17. ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ, ΕΙΔΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΟΛΙΚΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑ.....	185
15.18. ΘΕΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΡΟΓΝΩΣΤΙΚΗ ΑΞΙΑ.....	186
15.19. ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΔΙΑΛΟΓΗΣ.....	187
15.20. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΟΝ Η/Υ.....	188
16. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΑΡΧΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΙΑΤΡΙΚΗ	189
16.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	189
16.2. ΙΑΤΡΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ.....	189
16.3. ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΤΗΝ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΙΑΤΡΙΚΗ.....	189
16.4. ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΗΝ ΠΟΡΕΙΑ ΤΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΙΑΤΡΙΚΗ.....	190
16.5. ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΣΠΙΝΘΗΡΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ. Η ΠΡΟΒΟΛΙΚΗ Γ-ΚΑΜΕΡΑ.....	191
16.5.1. Κρύσταλλοι-Ανιχνευτές.....	191

16.5.2. Νεότεροι κρύσταλλοι ανιχνευτές και φωτοανιχνευτές στερεάς κατάστασης-ημιαγωγοί.....	192
16.6. ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΗΡΕΣ	193
16.7. ΦΩΤΟΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΤΕΣ-PHOTOMULTIPLIER TUBE (PMT)	195
16.8. ΑΝΑΛΥΤΗΣ ΨΥΦΟΥΣ ΠΑΛΜΩΝ-PULSE HEIGHT ANALYSER (PHA)	195
16.9. Η ΠΡΟΒΟΛΙΚΗ ΕΙΚΟΝΑ	196
16.10. ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ Γ-ΚΑΜΕΡΑ	197
16.11. ΑΡΧΕΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΙΑΤΡΙΚΗ	199
16.12. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ	199
16.13. ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ (SOFTWARE).....	200
16.14. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΩΝ-ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ	200
16.15. ΤΜΗΜΑ ΙΝΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ-ΟΡΓΑΝΟΛΟΓΙΑ	201
16.16. ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗ ΚΑΙ ΣΚΕΔΑΣΗ.....	202
16.17. ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ Γ-ΚΑΜΕΡΑΣ	203
17. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ.....	205
17.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	205
17.2. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΜΩΝ	205
17.3. ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ-ΗΜΙΤΟΝΟΓΡΑΜΜΑ.....	206
17.4. ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΜΟΝΗΡΟΥΣ ΦΩΤΟΝΙΟΥ- SINGE PHOTON EMISSION TOMOGRAPHY-(SPET)	206
17.5. ΈΛΕΓΧΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΚΗΣ Γ-ΚΑΜΕΡΑ (SPET)	207
17.6. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΛΙΝΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΣΤΗΝ SPET	208
18. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΠΟΖΙΤΡΟΝΙΩΝ (PET)	209
18.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	209
18.2. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΠΟΖΙΤΡΟΝΙΩΝ-ΚΥΚΛΟΤΡΟΝΙΟ	209
18.3. ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΙ-ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ PET	210
18.4. ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ, PET, ΤΕΧΝΙΚΑ ΛΑΘΗ ΚΑΙ ΨΕΥΔΕΙΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ.....	213
18.5. ΧΑΡΤΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗΣ-(ATTENUATION CORRECTION, AC).	214
18.6. Η ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΗΓΗΣ ΠΕΡΙΟΡΙΖΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΡΥΘΜΟ ΚΡΟΥΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΟ ΝΕΚΡΟ ΧΡΟΝΟ ΤΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ	214
18.7. ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗΣ (AC) ΚΑΙ ΠΙΘΑΝΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ.....	215
18.8. ΜΕΡΙΚΗ ΑΠΩΛΕΙΑ ΟΓΚΟΥ (PARTIAL VOLUME EFFECT, PVE).....	216
18.9. ΜΕΡΙΚΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΟΓΚΟΥ (PVC) ΜΠΟΡΕΙ ΝΑ ΕΠΙΤΕΥΧΘΕΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΦΙΛΤΡΟΥ	217
18.10. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ	218
19. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΑΠΟΤΡΟΠΗ	219
19.1. ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΑ ΟΠΛΑ	219
19.1.1. Πυρηνικά όπλα.....	219
19.1.2. ΗΠΑ και πυρηνικά.....	220
19.1.3. ΕΣΣΔ και πυρηνικά.....	220
19.1.4. Πυρηνικές δοκιμές	221
19.1.5. Επιθετικοί βαλλιστικοί πυραύλοι.....	223
19.1.6 Αντιβαλλιστικοί/ αμυντικοί πύραυλοι	225
19.1.7 Στρατιωτικοί δορυφόροι	225
19.1.8 Αντιδορυφορικά όπλα.....	225
19.1.9 Διαστημικά όπλα υψηλής ενέργειας	226
19.2. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΒΟΡΕΙΑΣ ΚΟΡΕΑΣ	226

19.2.1 ΤΙ ΘΑ ΓΙΝΕΙ ΣΤΟ ΚΟΣΜΟ ΑΝ Ο ΚΙΜ ΠΑΤΗΣΕΙ ΤΟ ΚΟΥΜΠΙ; ΥΠΑΡΧΕΙ ΣΤ' ΑΛΗΘΕΙΑ ΚΙΝΔΥΝΟΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗΣ?ΠΟΙΕΣ ΘΑ ΕΙΝΑΙ ΟΙ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ;ΤΙ ΚΡΥΒΕΙ Η ΕΠΟΜΕΝΗ ΜΕΡΑ;	226
19.2.2 ΟΙ ΠΥΡΗΝΙΚΟΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΣΗΜΕΡΑ	226
19.2.3 Η ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΗ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ	227
19.2.4 ΟΙ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΕΝΟΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ ΠΟΛΕΜΟΥ.....	227
19.2.5 ΑΠΕΙΛΗΤΙΚΑ ΤΑ ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΟΠΛΑ ΤΗΣ ΒΟΡΕΙΑΣ ΚΟΡΕΑΣ?	228
19.2.6 Η ΙΣΧΥΣ ΤΩΝ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ.....	228
19.3. ΟΙ ΣΥΜΑΝΤΙΚΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΑ ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΟΠΛΑ.....	229
19.4. ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ,ΜΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ «ΒΟΜΒΑ»	229
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	230
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	233

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Δεξαμενή προσωρινής αποθήκευσης συστάδων χρησιμοποιημένου καυσίμου....	107
Εικόνα 2: Δοχεία ξηράς αποθήκευσης συστάδων καυσίμου.	108
Εικόνα 3: Σιλό αποθήκευσης δοχείων υαλοποιημένων καταλοιπών στην Αγγλία. Κάθε μεταλλικός δίσκος στο πάτωμα καλύπτει ένα σιλό που περιέχει δέκα δοχεία τοποθετημένα κατακόρυφα το ένα πάνω στο άλλο. Οι λευκοί κύλινδροι είναι θωρακισμένες μηχανές φόρτωσης των δοχείων στα σιλό.....	110
Εικόνα 4: Η κλασική εικόνα του ατόμου κατά Rutherford	112
Εικόνα 5: Αρχή λειτουργίας του ΡΗΑ, επιλογή βέλτιστου «ενεργειακού παραθύρου» Α: 3 ενεργειακοί παλμοί περιλαμβάνονται εντός του ενεργειακού παραθύρου. Β: Επιλογή ενεργειακού παραθύρου ώστε να απορρίπτεται το πλείστον των σκεδαζόμενων παλμών....	196
Εικόνα 6: Προβολικό σπινθηρογράφημα σπονδυλικής στήλης μετά από χορήγηση στον εξεταζόμενο ^{99m}Tc – MDP	197
Εικόνα 7: Καμπύλες λειτουργίας των 2 νεφρών, υπολογισμός ποσοστών συμμετοχής, μεγίστου χρόνου διήθησης και χρόνου ημισείας απέκκρισης εκάστου.	201
Εικόνα 8: Η επιλογή των ορθών κριτηρίων λήξη με βάση το σύνολο των κρούσεων ή και το χρόνο, ή και τα δύο – είναι κρίσιμη για τη βελτίωση της ποιότητας της εικόνας.	202

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Χάρτης του Segre	9
Σχήμα 2: Τμήμα του χάρτη νουκλιδίων	10
Σχήμα 3: Ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο ($\Delta E/A$) συναρτήσει του μαζικού αριθμού A ...	12
Σχήμα 4: Δυναμική ενέργεια PE του συστήματος δύο πυρήνων - προϊόντων της σχάσης, ως συνάρτηση της μεταξύ των απόστασης r	13
Σχήμα 5: Απεικόνιση $M1A2$	34
Σχήμα 6: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος ανίχνευσης ραδιενεργών ακτινοβολιών με απαριθμητή σπινθηρισμών	40
Σχήμα 7: Φορητό όργανο με θάλαμο ιονισμού διαστάσεων $2\ 7/8'' \times 5\ 1/2''$ και ευαίσθητου όγκου 580 cc	45
Σχήμα 8: Δοσίμετρα (α) φωτογραφικό, (β) θερμοφωταύγειας	45
Σχήμα 9: Διάταξη της μεθόδου ανάλυσης φθορισμού με ακτίνες-X	50
Σχήμα 10: Η θερμοφωταύγεια σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας κατά την θέρμανση του κρυστάλλου	67
Σχήμα 11: Σχηματικό διάγραμμα αναλυτικού συστήματος για τη μέτρηση της θερμοφωταύγειας	67
Σχήμα 12: Η θερμοφωταύγεια κόρου σαν συνάρτηση της δόσης	68
Σχήμα 13: Θερμοκαμπύλες για διάφορες δόσεις ακτινοβολήσης του κρυστάλλου	70
Σχήμα 14: Κάθετη τομή γεωτρήπανου. Η διάμετρος του είναι 7.30 cm και το μήκος του είναι περίπου 1.7m.	74
Σχήμα 15: Στο σημείο A φτάνουν, εκτός από τα παρθένα φωτόνια με ενέργεια $E < E_0$	99
Σχήμα 16: Ραδιενέργεια από ένα τόνο εξαντλημένου καυσίμου αντιδραστήρα PWR. Η οριζόντια συνέχεια γραμμή δίνει τη συνολική ραδιενέργεια του κοιτάσματος ουρανίου από το οποίο παρήχθη το καύσιμο	109
Σχήμα 17: Απλουστευμένο σχήμα έκπτωσης του 68Ge	141
Σχήμα 18: Απλουστευμένη σχήμα έκπτωσης του 90Sr	142
Σχήμα 19: Απλουστευμένο σχήμα έκπτωσης του 188W	143
Σχήμα 20: Περιγραφή των διεργασιών οι οποίες ακολουθούνται κατά τους ποιοτικούς ελέγχους αποδοχής και τους περιοδικούς ελέγχους του συστήματος της γ - κάμερας	203
Σχήμα 21: Κατανομές κρούσεων μέσω του κέντρου των εικόνων. Απεικόνιση της μερικής απώλειας όγκου (PVE)	217
Σχήμα 22: Η Κυκλική πηγή ομοιόμορφης ραδιενέργειας σε μη ραδιενεργό υπόβαθρο παράγει την εικόνα στην οποία μέρος του σήματος το οποίο προέρχεται από την πηγή καταγράφεται εκτός της πραγματικής πηγής. Η μεγίστη καταγραφή ραδιενέργειας στην εικόνα μειώνεται κατά 85%	218

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Μεγέθη συστατικών σωματιδίων του ατόμου.....	5
Πίνακας 2: Στον Πίνακα 1.2 παρατίθενται η ισοτοπική σύσταση, ο μαζικός αριθμός (A), η (μέση) ατομική μάζα (M) και το ατομικό βάρος ορισμένων ισοτόπων στοιχείων.....	8
Πίνακας 3: Ραδιοϊσότοπα στο φυσικό ουράνιο.....	23
Πίνακας 4: Είδος και επίπεδο ακτινοβολίας (ενέργειας) από το φυσικό ουράνιο.....	24
Πίνακας 5: Σύγκριση φυσικού και απεμπλουτισμένου ουρανού.....	25
Πίνακας 6: Καθυστερημένα νετρόνια της σχάσης του 235U με θερμικά νετρόνια.....	49
Πίνακας 7: Ετήσιες δόσεις των φυσικών ραδιενεργών σε mrad/yr.....	70
Πίνακας 8: Συντελεστής W_{R} στάθμισης των ιονιζουσών ακτινοβολιών.....	84
Πίνακας 9: Συντελεστής στάθμισης W_T για την ενεργό δράση.....	85
Πίνακας 10: Μακρόβια ραδιοϊσότοπα φυσικής προέλευσης σε σώματα ανθρώπων.....	88
Πίνακας 11: Παγκόσμια μέση τιμή της ενεργού δόσης από φυσική ραδιενέργεια (UNSCEAR 2000).....	89
Πίνακας 12: Άμεσες σωματικές επιπτώσεις από ολόσωμη έντονη ακτινοβολία.....	92
Πίνακας 13: Συντελεστής ανοικοδόμησης για παράλληλη δέσμη φωτονίων και άπειρη πλακοειδή θωράκιση.....	102
Πίνακας 14: Συντελεστής ανοικοδόμησης για σημειακή πηγή φωτονίων και σφαιρική θωράκιση.....	103
Πίνακας 15: Τιμές των παραμέτρων του τύπου του Taylor.....	104
Πίνακας 16: Σωματίδιο ανταλλαγής της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης και μποζόνιο βαθμίδας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, το φωτόνιο ή κβάντο (quantum) του φωτός.....	114
Πίνακας 17: Πρωτεΐνες για μοριακή απεικόνιση.....	128
Πίνακας 18: Μονοκλωνικά αντισώματα για μοριακή απεικόνιση.....	128
Πίνακας 19: Παράγων βαρύτητας ιστού.....	155
Πίνακας 20: Εκτίμηση ετήσιας ενεργού δόσης σε παγκόσμιο επίπεδο από φυσικές πηγές σε περιοχές με κανονική ακτινοβολία υποστρώματος.....	156
Πίνακας 21: Ενεργός δόση ανά κάτοικο Χώρας από διαγνωστικές ιατρικές εφαρμογές.....	161
Πίνακας 22: Μετρούμενες τιμές συνάρτηση της κατανομής.....	168
Πίνακας 23: Μετρούμενες τιμές συνάρτηση της κατανομής.....	169
Πίνακας 24: Αποτέλεσμα της διαγνωστικής διαδικασίας.....	185
Πίνακας 25: Συγκριτικός πίνακας των χαρακτηριστικών των κρυστάλλων BGO, LSO και GSO σε σχέση με τις ιδιότητες οι οποίες χαρακτηρίζουν τον κρύσταλλο NaI(Tl).....	211
Πίνακας 26: Πυρηνικό οπλοστάσιο ΗΠΑ: 1945-1950.....	220
Πίνακας 27: Ατμοσφαιρικές δοκιμές το 1945.....	222
Πίνακας 28: Ατμοσφαιρικές δοκιμές το 1963.....	222
Πίνακας 29: Πύραυλοι μέσου και μεγάλου βεληνεκούς.....	223
Πίνακας 30: Τύποι βαλιστικών πυραύλων που δοκιμάστηκαν ως το τέλος του ψυχρού πολέμου Βαλλιστικοί διηπειρωτικοί πύραυλοι.....	224

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Συνάρτηση κατανομής συχνότητας	169
Διάγραμμα 2: Παράδειγμα κατανομής Gauss.....	170
Διάγραμμα 3: Πρότυπη καμπύλη αναφοράς ραδιοανοσολογικού προσδιορισμού. Από το ρυθμό κρούσεων του άγνωστου δείγματος R_x , προσδιορίζεται, μέσω της καμπύλης αναφοράς, η συγκέντρωση C_x	176
Διάγραμμα 4: Εύρεση της MDC σε δύο πρότυπες καμπύλες αναφοράς με διαφορετικές κλίσεις. Οι συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στην περιοχή ρυθμού κρούσεων μεταξύ R_0 και $R_0-2\sigma$ δε διαφέρουν στατιστικά από τη μηδενική συγκέντρωση. Η MDC ορίζεται εκεί που η ευθεία $R_0-2\sigma$ τέμνει την πρότυπη καμπύλη αναφοράς. Έτσι, η καμπύλη 2 με τη μικρότερη κλίση δίνει μεγαλύτερη τιμή για τη MDC (η ευαισθησία της μεθόδου με την καμπύλη 2 είναι χειρότερη).....	177
Διάγραμμα 5: Γράφημα Bland-Altman για τον έλεγχο της συμφωνίας μεταξύ των αποτελεσμάτων δύο μεθόδων.	184
Διάγραμμα 6: Η μετακίνηση του σημείου διαλογής μεταβάλλει την ευαισθησία και την ειδικότητα μιας διαγνωστικής εξέτασης (το σχήμα αποτελεί προσαρμογή αντίστοιχου σχήματος των Sardanelli και Di Leo)	188

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΤΟ ΑΤΟΜΟ ΚΑΙ Η ΔΟΜΗ ΤΟΥ

Η ύλη αποτελείται από άτομα (η έννοια του ατόμου θεμελιώθηκε πρώτη φορά από το Δημόκριτο). Το άτομο είναι το μικρότερο κομμάτι ύλης που μπορεί να διακριθεί με χημικές μεθόδους. Κάθε άτομο αποτελείται από ένα θετικά φορτισμένο πυρήνα, στον οποίο συγκεντρώνεται πρακτικά όλη η μάζα του ατόμου, και από ηλεκτρόνια που κινούνται γύρω από τον πυρήνα, (Πίνακας 1). Το 1913 ο Bohr διατύπωσε τις περιβόητες συνθήκες Bohr, δεχόμενος ότι τα ηλεκτρόνια κινούνται σε κυκλικές τροχιές γύρω από τον πυρήνα. Τα ηλεκτρόνια φέρουν αρνητικό φορτίο και καθώς βρίσκονται μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο του θετικά φορτισμένου πυρήνα έλκονται απ' αυτόν με δυνάμεις Coulomb:

$$F = \frac{m \times \dot{V}^2}{r} = \frac{Ze^2}{r^2} \quad [1]$$

Όπου:

m = η μάζα του ηλεκτρονίου,

\dot{V} = η ταχύτητά του,

r = η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς του,

e = το φορτίο του

Z = ο αριθμός των θετικών φορτίων του πυρήνα (δηλαδή ο αριθμός των πρωτονίων, ατομικός αριθμός).

Τα ηλεκτρόνια δεν πέφτουν πάνω στον πυρήνα ακριβώς λόγω της μεγάλης ταχύτητας με την οποία κινούνται. Οι ταχύτητες των ηλεκτρονίων στο άτομο είναι αρκετά μεγάλες ώστε, υπό συνήθεις συνθήκες, δεν τα αφήνουν να πέσουν πάνω στον πυρήνα, αλλά από την άλλη όχι τόσο μεγάλες ώστε, να βγουν έξω από το ηλεκτρικό πεδίο του πυρήνα που τα έλκει και να φύγουν από το άτομο. Η συνολική ενέργεια κάθε ηλεκτρονίου είναι το άθροισμα της ηλεκτρικής δυναμικής ενέργειας -λόγω της θέσης του στο ηλεκτρικό πεδίο του ατόμου- και της κινητικής ενέργειας λόγω της ταχύτητας με την οποία περιφέρεται γύρω από τον πυρήνα. Η συνολική ενέργεια εξαρτάται από την ακτίνα της τροχιάς που διαγράφει το ηλεκτρόνιο, εξαρτάται δηλαδή από την απόσταση του ηλεκτρονίου από τον πυρήνα.

Οι συνθήκες του Bohr

1. Η πρώτη συνθήκη, που καλείται και **μηχανική συνθήκη**, καθορίζει την κίνηση των ηλεκτρονίων που επιτρέπεται μόνο σε τροχιές (επιτρεπόμενες), ακτίνας r , έτσι ώστε η στροφορμή τους, L , να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της ποσότητας:

$$h = \frac{h}{2\pi} \quad [2]$$

Όπου:

$h = \eta$ σταθερά του Planck ($6.6 \cdot 10^{-27}$ erg·s)
Δηλαδή,

$$L = m \times \dot{V} \times r = h \times n \quad [3]$$

Όπου:

$n =$ ακέραιος αριθμός, ο κβαντικός αριθμός του Bohr ή κύριος κβαντικός αριθμός, που μπορεί να πάρει τις τιμές 1 (βασική τροχιά ή τροχιά Bohr), 2, 3, ...n.

2. Η δεύτερη συνθήκη, που καλείται και **οπτική συνθήκη**, καθορίζει ότι όταν το ηλεκτρόνιο μεταπηδήσει από μια εξωτερική, επιτρεπτή, τροχιά i_n (initial, αρχική του τροχιά) σε μια εσωτερική, επιτρεπτή, τροχιά f_n , (final, τελική του τροχιά), άλμα που είναι δυνατόν να γίνει, τότε το άτομο εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συχνότητας, ν , που δίνεται από τη σχέση:

$$E_{i_n} - E_{f_n} = h \times \nu \quad [4]$$

Όπου:

E_{i_n} και $E_{f_n} = \eta$ ενέργεια του ηλεκτρονίου στην αρχική και τελική τροχιά του, αντίστοιχα.

Στην περίπτωση αυτή έχουμε αποδιέγερση του ατόμου, αντίθετο άλμα του ηλεκτρονίου από εσωτερική, επιτρεπτή, τροχιά i_n σε εξωτερική, επιτρεπτή, τροχιά f_n , είναι, επίσης, δυνατόν να γίνει μόνο με απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας συχνότητας, ν , που διέπετε από την ίδια σχέση, (4). Στην περίπτωση αυτή έχουμε διέγερση του ατόμου. Όταν το ηλεκτρόνιο απομακρυνθεί (αποσυνδεθεί) τελείως από το άτομο, τότε έχουμε ιονισμό του ατόμου (περισσότερα στη συνέχεια της παραγράφου). Προφανώς, όταν το ηλεκτρόνιο παραμένει σε μία επιτρεπόμενη τροχιά δεν ακτινοβολεί και η ενέργεια του είναι σταθερή.

Παρατήρηση: Η ιδέα που εισήγαγε ο Bohr ήταν ότι μια φυσική ποσότητα, στην προκειμένη περίπτωση η στροφορμή, δεν μπορεί να πάρει συνεχείς τιμές, αλλά μόνο συγκεκριμένες τιμές. Είναι ως εάν ένας περιστρεφόμενος τροχός θα μπορούσε να πάρει μόνο συγκεκριμένες ταχύτητες και όχι κάποιες που βρίσκονται ανάμεσα σ αυτές. Μεταβολή στην ταχύτητα είναι δυνατή, όμως μόνο με «άλμα» και όχι συνεχείς τιμές. Η άποψη αυτή ωστόσο δεν έρχεται σε αντίφαση με την κλασική άποψη της συνέχειας. Στο μακρόκοσμο, τα επιτρεπόμενα αυτά άλματα είναι τόσο μικρά που δεν είναι αξιοσημείωτα δίνοντας την εικόνα της συνέχειας. Η θεωρία αυτή του Bohr ήταν η αρχή μιας νέας θεώρησης της φύσης.

Από τις σχέσεις (1) και (3), εύκολα συνεπάγεται ότι το ηλεκτρόνιο κινείται γύρω από τον πυρήνα σε κυκλική τροχιά, ακτίνας και ταχύτητας αντίστοιχα:

$$r_n = \frac{n^2 \times h^2}{Z \times e^2 \times m} \quad [5]$$

$$\frac{r}{V_n} = \frac{Z \times e^2}{n \times h} \quad [6]$$

Η ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου (δυναμική συν κινητική) κινουμένου σε επιτρεπτή τροχιά με κβαντικό αριθμό n , δίνεται από τη σχέση:

$$E_{\text{tot}} = \frac{Z^2 \times e^4 \times m}{2 \times n^2 \times h^2} \quad [7]$$

Η τιμή αυτή της ολικής ενέργειας του ηλεκτρονίου στη σχέση (6-7), θα μας δώσει τη συχνότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που θα εκπέμψει το άτομο όταν γίνει ένα άλμα του ηλεκτρονίου από μια επιτρεπτή εξωτερική τροχιά n σε μια επιτρεπτή εσωτερική τροχιά m :

$$\nu_{\text{fin, in}} = \frac{E_{\text{in}} - E_{\text{fin}}}{h} = \frac{Z^2 \times e^4 \times m}{4 \times \pi \times h^3} \left(\frac{1}{n_{\text{fin}}^2} - \frac{1}{n_{\text{in}}^2} \right) \quad [8]$$

Στη φασματοσκοπία χρησιμοποιείται περισσότερο το αντίστροφο του μήκους κύματος, δηλαδή το $1/\lambda$, που λέγεται και **αριθμός κύματος** (ή **κυματάριθμος**) και υπολογίζεται από τη σχέση (8), αν ληφθεί υπόψη και η γνωστή σχέση:

$$c = \nu \times \lambda \quad [9]$$

Όπου:

c η ταχύτητα του φωτός.

Ηλεκτρόνια (e)

Σύμφωνα λοιπόν με τη θεωρία του Bohr, το άτομο είναι ένα κβαντομηχανικό (**κβάντωση** = κατακερματισμός σε στοιχειώδη τμήματα ή πακέτα, ασυνέχεια) σύστημα, πράγμα που συνεπάγεται, μεταξύ άλλων, ότι τα ηλεκτρόνια του ατόμου δεν μπορούν να έχουν οποιαδήποτε ενέργεια, αλλά μόνο διακριτές επιτρεπόμενες στάθμες ενέργειας, διαφορετικές για κάθε στοιχείο και χαρακτηριστικές κάθε στοιχείου. Για παράδειγμα άλλες είναι οι επιτρεπόμενες ενεργειακές στάθμες του ηλεκτρονίου του ατόμου του H_2 και άλλες οι επιτρεπόμενες ενεργειακές στάθμες των ηλεκτρονίων του ατόμου του O_2 .

Διέγερση ηλεκτρονίων

Τα ηλεκτρόνια ενός οποιουδήποτε ατόμου, όπως επιβάλλεται από την **απαγορευτική αρχή του Pauli**, κινούνται κατανομημένα σε τροχιές διαφόρων ακτίνων. Ηλεκτρόνια που κινούνται σε τροχιές της ίδιας ακτίνας λέμε ότι ανήκουν στον ίδιο **φλοιό**. Τα ηλεκτρόνια ενός ατόμου τείνουν πάντα να έχουν όσο το δυνατόν μικρότερη ενέργεια, που σημαίνει δηλαδή ότι τείνουν να καταλάβουν τις τροχιές με μικρότερη ακτίνα. Κατανέμονται επομένως κατά τέτοιο τρόπο ώστε να συμπληρώνεται πρώτα ο πρώτος εσωτερικός φλοιός, στη συνέχεια ο δεύτερος, ο τρίτος, κ.ο.κ. όσο υπάρχουν διαθέσιμα ηλεκτρόνια. Η κατάσταση του ατόμου με τη μικρότερη από τις επιτρεπόμενες ενέργειες των ηλεκτρονίων είναι η μόνη ευσταθής και ονομάζεται **θεμελιώδης κατάσταση**. Υπό συνήθεις συνθήκες το άτομο βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση. Οι άλλες επιτρεπόμενες καταστάσεις είναι μη ευσταθείς και ονομάζονται, και είναι, καταστάσεις διέγερσης, οι δε αντίστοιχες ενεργειακές στάθμες ονομάζονται **στάθμες διέγερσης**. Είναι δυνατόν να προσδοθεί σε κάποιο ηλεκτρόνιο του ατόμου εξωτερική ως προς το άτομο ενέργεια, π.χ. με σύγκρουση με άλλο άτομο, και το ηλεκτρόνιο να βρεθεί σε κάποια ενεργειακή στάθμη διέγερσης. Στην κατάσταση αυτή δεν θα παραμείνει για πάντα. Κάποια στιγμή το άτομο θα αποβάλει την περίσσεια ενέργεια εκπέμποντας ένα ή περισσότερα φωτόνια που θα φέρουν αυτήν την περίσσεια ενέργεια και θα επιστρέψει στην ευσταθή θεμελιώδη κατάσταση.

Έστω ότι κάποιος φορέας ενέργειας επιχειρήσει να προσδώσει ενέργεια σε ηλεκτρόνιο ενός ατόμου τότε εάν η προσφερόμενη ενέργεια είναι μικρότερη απ' αυτήν που απαιτείται για να ανέλθει το ηλεκτρόνιο στην πρώτη στάθμη διέγερσης (για το υδρογόνο 10.2eV), το άτομο

θα αγνοήσει τον εξωτερικό φορέα ενέργειας και θα παραμείνει στη θεμελιώδη του κατάσταση. Εάν όμως η προσφερόμενη ενέργεια είναι επαρκώς μεγάλη, το ηλεκτρόνιο θα ανέλθει σε στάθμη διέγερσης. Από τη στάθμη αυτή θα επανέλθει στη θεμελιώδη του κατάσταση αποβάλλοντας την περίσσεια ενέργεια συνήθως με εκπομπή φωτονίων. Σημειώνεται ότι ενέργεια στάθμης, είναι η διαφορά της ενέργειας της στάθμης από την ενέργεια της θεμελιώδους στάθμης.

Έστω ότι το ηλεκτρόνιο του ατόμου του υδρογόνου προσέλαβε, με κάποιο τρόπο, ενέργεια και ανήλθε στη δεύτερη στάθμη, όπου έχει ενέργεια $E_2=12.1\text{eV}$. Από εκεί θα αποδιεγερθεί και θα επιστρέψει στη θεμελιώδη του κατάσταση με τους εξής δύο πιθανούς τρόπους: α) Πέφτοντας αρχικά στην πρώτη στάθμη ενέργειας $E_1=10.2\text{eV}$ με εκπομπή ενός φωτονίου ενέργειας $E_2-E_1= 1.9\text{eV}$, που είναι στο ορατό «φάσμα» χρώματος κόκκινου. Στη συνέχεια, πέφτει από την πρώτη στάθμη στη θεμελιώδη εκπέμποντας ένα φωτόνιο ενέργειας 10.2eV , που βρίσκεται στο υπεριώδες του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. β) Πέφτοντας κατ' ευθείαν από τη δεύτερη στάθμη στη θεμελιώδη κατάσταση με εκπομπή ενός φωτονίου ενέργειας 12.1eV , που βρίσκεται στο υπεριώδες του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Ακτίνες X ή ακτίνες Roentgen

Ηλεκτρόνια των ατόμων στοιχείων με μεγάλο ατομικό αριθμό Z , μετά από κατάλληλη διέγερση, αποδιεγείρονται εκπέμποντας φωτόνια με ενέργειες μεγαλύτερες από αυτές του ορατού φάσματος και της υπεριώδους ακτινοβολίας, δηλαδή ενέργειες από $1-100\text{keV}$. Όταν ο Roentgen ανακάλυψε αυτήν την ακτινοβολία πριν από το τέλος του 20^{ου} αιώνα την ονόμασε **ακτίνες X**, δηλαδή άγνωστες ακτίνες, διότι ήταν άγνωστη τότε η φύση και η προέλευσή της. Η ονομασία αυτή παρέμεινε. Με δέσμες τέτοιων φωτονίων βγαίνουν οι ιατρικές και άλλες ακτινογραφίες, όπως π.χ. στον έλεγχο αποσκευών στα αεροδρόμια. Αυτό γιατί τα φωτόνια τέτοιων ενεργειών έχουν εξαιρετική ικανότητα να διαπερνούν την ύλη, να μην απορροφώνται εύκολα από αυτήν. Η διαπεραστική τους ικανότητα είναι μικρότερη στα μέταλλα και τα οστά. Έτσι όταν μέρος του ανθρώπινου σώματος παρεμβάλλεται μεταξύ δέσμης ακτίνων-X και φωτογραφικού φιλμ, τα φωτόνια διαπερνούν σχεδόν ανεμπόδιστα τη σάρκα και στις αντίστοιχες θέσεις «μαυρίζουν» το φωτογραφικό φιλμ, ενώ διαπερνούν πολύ λιγότερο τα οστά, οπότε στις αντίστοιχες θέσεις το φιλμ «δεν μαυρίζει τόσο», ενώ ο βαθμός της λευκότητάς ή του μαυρίσματος εξαρτάται από το μέγεθος της μάζας μέσα από την οποία διέρχονται τα φωτόνια της ακτινοβολίας-X. Αποτυπώνεται έτσι στο φιλμ το είδωλο των οστών.

Ιοντισμός του ατόμου

Αν τώρα σε ηλεκτρόνιο ατόμου προσδοθεί ενέργεια μεγαλύτερη από κάποια τιμή, τότε το ηλεκτρόνιο αυτό είναι δυνατόν να αποσπάσει από το άτομο, να καταστεί ελεύθερο ηλεκτρόνιο. Κάτι τέτοιο μπορεί π.χ. να γίνει με σύγκρουση του ατόμου με σωματίδιο κινούμενο με μεγάλη ταχύτητα. Όταν ένα ηλεκτρόνιο αποσπάσει από το άτομο, τότε το άτομο έχει ένα λιγότερο ηλεκτρόνιο από όσα χρειάζεται για να είναι ηλεκτρικά ουδέτερο, οπότε είναι φορτισμένο με το κβάντο του θετικού ηλεκτρικού φορτίου. Στην κατάσταση αυτή το άτομο είναι **ión** ουδέτερη μετοχή του ρήματος «είμι», που σημαίνει "πορεύομαι, οδεύω". Τα ίοντα πήραν αυτό το όνομα επειδή, όντας ηλεκτρικά φορτισμένα, υπό την επίδραση ηλεκτρικών δυνάμεων, μετακινούνται («πορεύονται»). Η απόσπαση ενός ή περισσότερων ηλεκτρονίων από ένα άτομο ονομάζεται ιοντισμός του ατόμου, η δε ενέργεια που απαιτείται να προσδοθεί στο ηλεκτρόνιο για τον ιοντισμό ενός συγκεκριμένου ατόμου ονομάζεται ενέργεια ιοντισμού του ατόμου αυτού. Τα ίοντα είναι εξαιρετικά επιρρεπή στην πρόκληση χημικών αντιδράσεων λόγω ακριβώς των ηλεκτρονίων που τους λείπουν.

Πίνακας 1: Μεγέθη συστατικών σωματιδίων του ατόμου

Σωματίδιο	Μάζα (kg)	Φορτίο	Ακτίνα	Μαγνητική ροπή	Σπιν (S) * ¹	Στροφορμή (L) * ²
Ηλεκτρόνιο	$9.11 \cdot 10^{-31} =$ $0.511 \text{MeV} \text{ *}^3$	$-16.10^{-19} \text{Cb} =$ $= -4.8 \cdot 10^{-10} \text{esu} \text{ *}^4$	$2.82 \cdot 10^{-13} \text{cm} =$ $2.82 \text{fm} \text{ *}^5$	$\mu_B = (1/2) \cdot (e/m_e) \cdot (h/2\pi) =$ $9.27 \cdot 10^{-24} \text{Amp.m}^2 =$ $9.27 \cdot 10^{-21} \text{HMM}$ (μαγνητόνη του Bohr)	$(1/2) \cdot (h/2\pi)$	$n \cdot (h/2\pi) \text{ *}^6$
Πρωτόνιο	$1.673 \cdot 10^{-27} =$ $938.28 \text{MeV} = 1u$ *^7	$16.10^{-19} \text{Cb} = 4.8 \cdot 10^{-10} \text{esu}$		$\mu_N =$ $(1/2) \cdot (e/m_p) \cdot (h/2\pi) =$ $= 5.05 \cdot 10^{-27} \text{Amp.m}^2 =$ $= 5.05 \cdot 10^{-24} \text{HMM}$	$(1/2) \cdot (h/2\pi)$	
Νετρόνιο	$1.675 \cdot 10^{-27} =$ 939.57MeV	0		$\mu_n = -1.91 \mu_N$	$(1/2) \cdot (h/2\pi)$	
Πυρήνας	$(1.67 \cdot 10^{-27}) \cdot A \text{ *}^8$	$(16.10^{-19}) \cdot Z \text{Cb} =$ $= (4.8 \cdot 10^{-10}) \cdot Z \text{esu} \text{ *}^9$	$(1.2 \cdot 10^{-13}) \cdot A^{1/3} \text{cm}$	$\mu_p = -1.91 \mu_N$ (πυρηνική μαγνητόνη)		
Άτομο	$(1.67 \cdot 10^{-27}) \cdot A$	0	10^{-8}cm			

*¹Το σπιν του ηλεκτρονίου, ή ίδια στροφορμή, λόγω περιφοράς του περί άξονα διερχόμενο από το κέντρο μάζας του.

*²Η στροφορμή του λόγω περιφοράς γύρω από τον πυρήνα.

*³ $1 \text{MeV} = 10^6 \text{eV} = 1.6022 \cdot 10^{-13} \text{J}$, $1 \text{eV} = (1.6 \cdot 10^{-19} \text{Cb}) \cdot (1 \text{Volt}) = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{J} = 1.6 \cdot 10^{-12} \text{erg}$. Σύμφωνα με την θεωρία της σχετικότητας, του Einstein, ότι: μάζα = ενέργεια

*⁴esu = ηλεκτροστατική μονάδα φορτίου (electrostatic unit).

*⁵1fm (femto meter) = $10^{-15} \text{m} = 10^{-13} \text{cm}$, μονάδα που χρησιμοποιείται για πυρηνικές διαστάσεις, όπως η μονάδα Angstrom για ατομικές διαστάσεις.

*⁶n=ακέραιος αριθμός (1, 2, ..., n) ή κύριος κβαντικός αριθμός.

*⁷1u=1amu (μονάδα ατομικής μάζας) = $(1/12)M_{C-12} = 931.5 \text{MeV}$

*⁸A: μαζικός αριθμός.

*⁹Z: ατομικός αριθμός

ΠΥΡΗΝΑΣ ΤΟΥ ΑΤΟΜΟΥ

Ο **πυρήνας** συνίσταται από στοιχειώδη σωματίδια τα πρωτόνια και τα νετρόνια που μαζί ονομάζονται **νουκλεόνια**, (Πίνακας 1.1). Ο πυρήνας περιέχει Z και N σε αριθμό πρωτόνια και νετρόνια, αντίστοιχα. Ισάριθμα προς τα πρωτόνια, δηλαδή Z ηλεκτρόνια του ατόμου περιφέρονται γύρω από τον πυρήνα. Το Z καλείται **ατομικός αριθμός** και το **Ναριθμός νετρονίων** ή **νετρονικός αριθμός**. Το άθροισμα $A=Z+N$ καλείται **μαζικός αριθμός** ή **αριθμός μάζας** και συμβολίζεται με το A . Συμβολισμός στοιχείου (Σ): ${}^A_Z\text{S}$ ή ${}_Z\text{S}^A$ ή Σ - A

Πρωτόνιο (p)

Το **πρωτόνιο** είναι σωματίδιο φορτισμένο θετικά με το κβάντο του ηλεκτρικού φορτίου, δηλαδή με φορτίο ίσο και αντίθετο με το φορτίο του αρνητικού ηλεκτρονίου. Η μάζα του πρωτονίου είναι περίπου 1836 φορές μεγαλύτερη από τη μάζα του ηλεκτρονίου.

Το νετρόνιο είναι σωματίδιο ηλεκτρικά ουδέτερο, ενώ η μάζα του είναι πρακτικά ίση με τη μάζα του πρωτονίου. Το νετρόνιο δεν έχει φορτίο και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί περισσότερο αποτελεσματικά για να διασχίσει ένα «σύννεφο ηλεκτρονίων» και να αντιδράσει με ένα πυρήνα στόχο. Τα νετρόνια ανιχνεύονται μόνο λόγω της αντίδρασής τους με την ύλη, η οποία προκαλεί εκπομπή φορτισμένων σωματιδίων και στη συνέχεια ιονισμό. Το νετρόνιο δεν επιβιώνει για πολύ έξω από τον πυρήνα, είναι ασταθές σωματίδιο, διασπάται σε ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο. Η μέση διάρκεια ζωής του ελεύθερου νετρονίου είναι $\sim 10\text{min}$. Η μέση ταχύτητα των ελευθέρων νετρονίων με τη μικρότερη ενέργεια σ' ένα αντιδραστήρα είναι περίπου $2,200\text{m/s}$, ενώ η τυπική διάσταση των αντιδραστήρων ισχύος είναι περίπου 4.5m . Άρα το «πιο αργό» νετρόνιο διασχίζει τον αντιδραστήρα σε χρόνο της τάξης των 2ms . Ακόμα, οι αντιδράσεις πυρήνων με νετρόνια πραγματοποιούνται σε χρόνο της τάξης των 10^{-14}s . Η αστάθεια λοιπόν του νετρονίου είναι χωρίς πρακτική σημασία στους αντιδραστήρες (αφού διαρκεί εξαιρετικά λίγο) και θεωρούμε το νετρόνιο ευσταθές σωματίδιο.

Ο πυρήνας κάθε ατόμου μπορεί να θεωρηθεί σε πρώτη προσέγγιση ότι έχει σφαιρικό σχήμα. Η **ακτίνα** του πυρήνα μπορεί να υπολογιστεί με διάφορες μεθόδους, πυρηνικές ή ηλεκτρομαγνητικές, (Πίνακας 1). Επειδή η μάζα του ηλεκτρονίου είναι αμελητέα, η μάζα των στοιχείων δίδεται από το άθροισμα των μαζών των πρωτονίων και των νετρονίων από τα οποία αποτελείται ο πυρήνας. Κατά συνέπεια, η **μάζα** του πυρήνα είναι ανάλογη του αριθμού των πρωτονίων και των νετρονίων που περιέχει, δηλαδή του μαζικού αριθμού A , (Πίνακας 1):

$$M = Zm_p + Nm_n \approx (Z + N)m_p = Am_p \quad [10]$$

Όπου:

$$m_p = m_n = 1.67 \times 10^{-24} \text{ g}$$

Ως μονάδα ατομικής μάζας (amu) ορίζεται το 1/12 της μάζας του ατόμου του ${}^{12}_6\text{C}$ (ή C-12). Αυτή είναι ίση με $1.660438 \times 10^{-24}\text{g}$. Ο πυρήνας ενός ατόμου συγκεντρώνει περίπου το 99.975 % της μάζας του ατόμου. Σε υπολογισμούς μεγάλης ακρίβειας, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το έλλειμμα μάζας. Τέλος, η **πυρηνική πυκνότητα** δίνεται από τη σχέση:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad \left| \quad \rho = \frac{Zm_p + Nm_n}{\frac{4}{3}\pi R^3} \gg \frac{(Z+N)m_p}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{Am_p}{\frac{4}{3}\pi R^3} = 10^8 \text{ t/cm}^3 \right. \quad [11]$$

[10]

Ισότοπα Στοιχεία

Υπάρχουν πυρήνες ενός και του αυτού στοιχείου δηλαδή του ίδιου ατομικού αριθμού Z , που έχουν όμως διαφορετικό αριθμό νετρονίων N , άρα και διαφορετικό μαζικό αριθμό A . Τα στοιχεία στα οποία ανήκουν οι πυρήνες αυτοί, καλούνται **ισότοπα** ή **νουκλίδια** στοιχεία. Ο αριθμός Z των πρωτονίων στον πυρήνα καθορίζει τις χημικές ιδιότητες, είναι η χημική ταυτότητα του ατόμου. Διαφορετικά ισότοπα ενός στοιχείου έχουν κάπως διαφορετικές φυσικές ιδιότητες, όπως σημείο τήξης, σημείο βρασμού, ρυθμό διάχυσης, που παρουσιάζουν όμως ιδιαίτερο ενδιαφέρον στη βιομηχανία.

Παρατήρηση: Πυρήνες με τον ίδιο μαζικό αριθμό A , αλλά διαφορετικούς ατομικούς αριθμούς Z , ονομάζονται **ισοβαρείς**, ενώ πυρήνες με τον ίδιο αριθμό νετρονίων ονομάζονται **ισότονοι**.

Παρατήρηση:

A. Ο μαζικός αριθμός A , ενός νουκλιδίου, όπως είναι αυτονόητο, είναι ακέραιος αριθμός και δεν πρέπει να συγχέεται με τη μάζα M του ισότοπου στοιχείου που δεν είναι ακέραιος και διαφέρει ελάχιστα από το μαζικό αριθμό. Για παράδειγμα, ο πυρήνας του $^{12}_6\text{C}$ έχει $A=12$ και $M=12.01115$, ενώ ο πυρήνας $^{226}_{88}\text{Ra}$ έχει $A=226$ και $M=226.0254$. Οι ατομικές μάζες M των ισωτόπων στοιχείων εκφράζονται σε μονάδες ατομικής μάζας ($1u=(1/12)M_{12\text{C}}$), δηλαδή το $1/12$ της μάζας του ισωτόπου του $^{12}_6\text{C}$ σε g ή σε MeV ($1u=931.5MeV$). Η μέτρηση των ισοτοπικών μαζών γίνεται με τα φασματόμετρα ή φασματογράφους μάζας.

B. Επίσης, δεν πρέπει να συγχέεται η ατομική μάζα M ενός ισωτόπου με το ατομικό βάρος ενός στοιχείου. Για παράδειγμα, του ισωτόπου του ουρανίου $U-238$ ($^{238}_{92}\text{U}$), ο μαζικός αριθμός (ακέραιος πάντα) είναι $Z=238$, η ατομική μάζα είναι $M=238.050770u$, ενώ το ατομικό βάρος του στοιχείου ουρανίου είναι $AB=238.03$. Στη φύση τα περισσότερα στοιχεία βρίσκονται ως μίγματα ισωτόπων σε ορισμένη αναλογία. Έτσι, **οι ατομικές μάζες που δίνονται στον περιοδικό πίνακα των στοιχείων, μετρημένες με χημικές μεθόδους, είναι μέσες τιμές των ατομικών μαζών των ισωτόπων του στοιχείου.**

Παραδείγματα:

- A.** Το **οξυγόνο** για παράδειγμα απαντάται σε τρεις διαφορετικές μορφές. Η κάθε μία έχει οκτώ πρωτόνια, αλλά κάποια άτομα οξυγόνου έχουν 8 νετρόνια, κάποια 9 και κάποια 10 νετρόνια. Λέμε λοιπόν ότι το οξυγόνο απαντάται στη φύση με τη μορφή τριών ισωτόπων. Τα στοιχεία των οποίων οι πυρήνες έχουν τον ίδιο αριθμό πρωτονίων λέγονται **ισότοπα**, επειδή καταλαμβάνουν την ίδια θέση (τόπο) στον περιοδικό πίνακα των στοιχείων, ανεξάρτητα από τον αριθμό των νετρονίων. Έτσι τα τρία ισότοπα του οξυγόνου έχουν μαζικούς αριθμούς 16, 17 και 18 και ονομάζονται «οξυγόνο δεκαέξι», «οξυγόνο δεκαεπτά» και «οξυγόνο δεκαοκτώ».

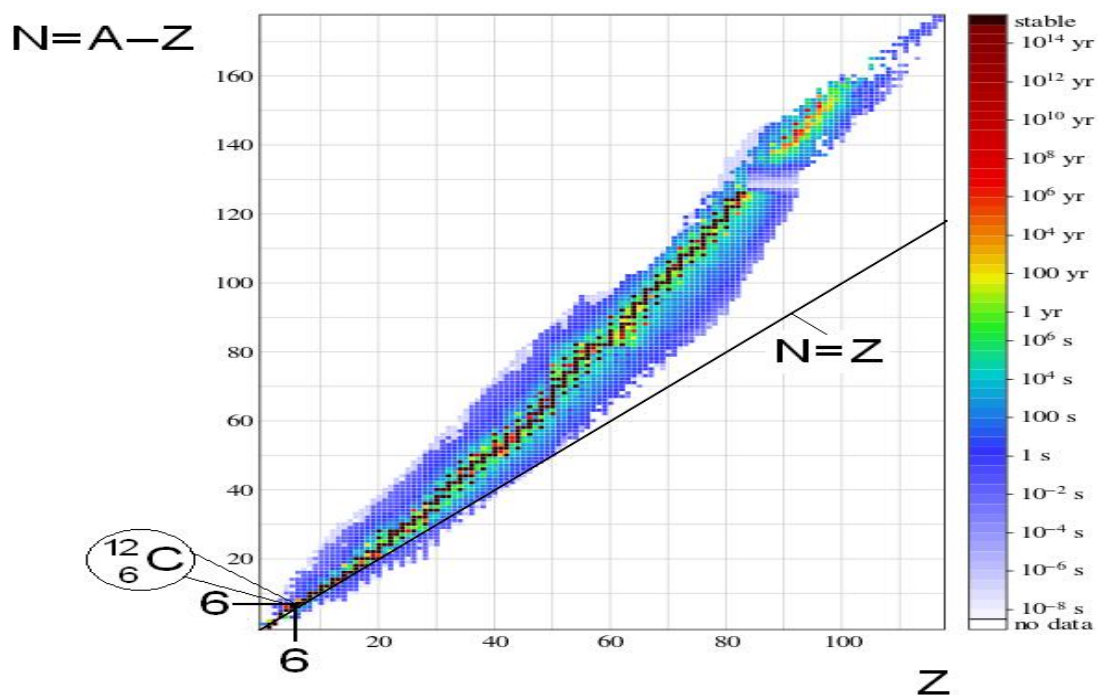
- B. Το απλούστερο άτομο είναι αυτό του **υδρογόνου**, του οποίου ο πυρήνας έχει ένα πρωτόνιο. Συμβολίζεται ${}^1_1\text{H}$ και αποτελεί το 99.985% του υδρογόνου στη φύση. Το υδρογόνο ωστόσο στη φύση υπάρχει και σε δύο άλλες μορφές, υπάρχει δηλαδή με τη μορφή δύο ακόμη ισοτόπων. Το ένα έχει πυρήνα με ένα πρωτόνιο και ένα νετρόνιο, ονομάζεται βαρύ υδρογόνο ή δευτέριο και συμβολίζεται ${}^2_1\text{H}$. Το άλλο έχει πυρήνα με ένα πρωτόνιο και δύο νετρόνια, ονομάζεται υπέρβαρη ή τρίτιο και συμβολίζεται ${}^3_1\text{H}$.
- C. Το **φυσικό ουράνιο** αποτελείται από 0.714% ${}^{235}_{92}\text{U}$, από $\pm 0.006\%$ ${}^{234}_{92}\text{U}$ και το υπόλοιπο 99.28% είναι ${}^{238}_{92}\text{U}$. Το φυσικό ουράνιο χρησιμοποιείται ως καύσιμο στους περισσότερους αντιδραστήρες βαρέος ύδατος. Το ${}^{233}_{92}\text{U}$ το οποίο δεν βρίσκεται ελεύθερο στη φύση είναι επίσης καλό καύσιμο. Αυτό παράγεται από το ${}^{232}_{88}\text{Th}$ που βρίσκεται ελεύθερο στη φύση με απορρόφηση νετρονίων.

Πίνακας 2: Στον Πίνακα 1.2 παρατίθενται η ισοτοπική σύσταση, ο μαζικός αριθμός (A), η (μέση) ατομική μάζα (M) και το ατομικό βάρος ορισμένων ισοτόπων στοιχείων.

Ισότοπο	Ισοτοπική αναλογία(%)	A	Ατομική μάζα, M (u)	AB
${}^1_1\text{H}$	99.985	1	1.00782519	1.00797
${}^2_1\text{H}$	0.015	2	2.01410222	
${}^3_1\text{H}$		3	3.01604971	
${}^{12}_6\text{C}$		12	12.00000000	12.01115
${}^{14}_6\text{C}$		14	14.00324197	
${}^{16}_8\text{O}$	99.759	16	15.994915	15.9994
${}^{17}_8\text{O}$	0.037	17	16.999133	
${}^{18}_8\text{O}$	0.204	18	17.999160	
${}^{39}_{19}\text{K}$		39	38.9637101	39.102
${}^{39}_{19}\text{K}$		40	39.9639998	
${}^{226}_{88}\text{Ra}$		226	226.025360	226.0254
${}^{228}_{88}\text{Ra}$		228	228.031139	
${}^{228}_{90}\text{Th}$		228	228.028750	
${}^{232}_{88}\text{Th}$		232	232.038124	232.038
${}^{233}_{92}\text{U}$		233	233.03950	
${}^{235}_{92}\text{U}$	0.715	235	235.043915	
${}^{238}_{92}\text{U}$	99.28	238	238.050770	238.03

Στο *Σχήμα 1* απεικονίζεται ο γνωστός ως **χάρτης του Segre** ή **χάρτης των πυρήνων**. Πρόκειται για ένα διάγραμμα στο οποίο αποτυπώνονται οι θέσεις στο δισδιάστατο χώρο (Z,N) των διαφόρων γνωστών πυρήνων, συναρτήσει του ατομικού (Z) και του νετρονικού

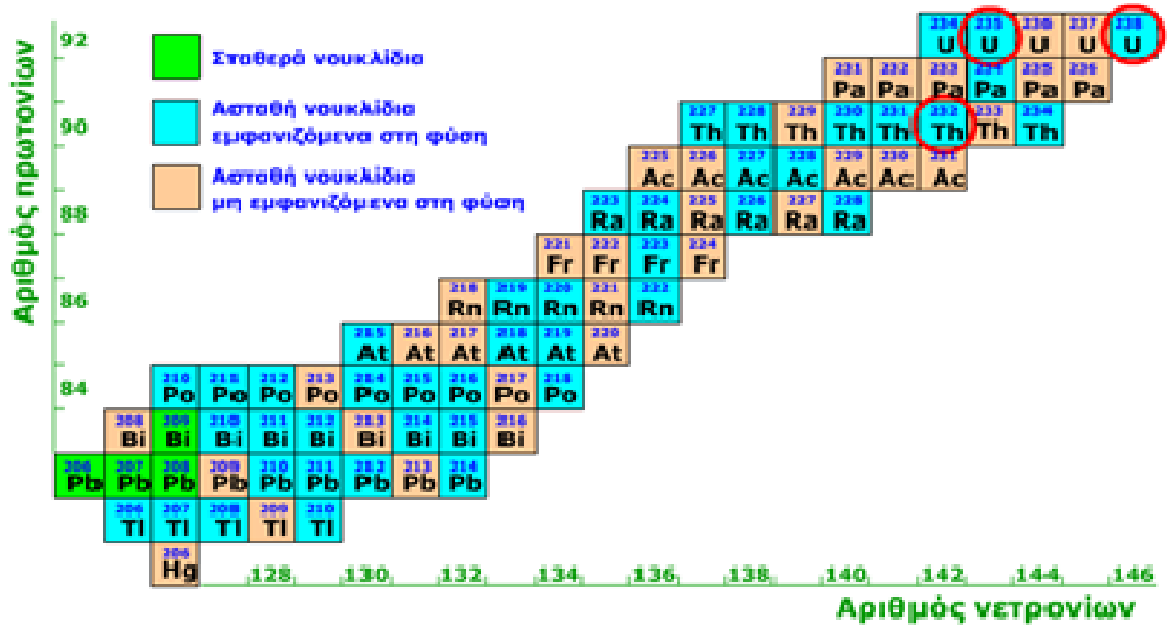
τους (N) αριθμού. Οι διάφοροι πυρήνες στο διάγραμμα αυτό σημειώνονται με διάφορα σύμβολα ή χρώματα, ανάλογα με το αν είναι ευσταθής ή ασταθής. Στη δεύτερη περίπτωση γίνεται διάκριση, ανάλογα με το είδος του εκπεμπόμενου σωματιδίου κατά τη διάσπαση του πυρήνα. Οι **ευσταθείς** πυρήνες παραμένουν αναλλοίωτοι με την πάροδο του χρόνου, ενώ οι **ασταθείς** πυρήνες, κάποια χρονική στιγμή μεταβάλλονται αυτομάτως, είτε με εκπομπή σωματιδίου, είτε με αρπαγή περιφερειακού ηλεκτρονίου. Εύκολα διαπιστώνει κανείς από το εν λόγω διάγραμμα, ότι για $Z > 20$, σχεδόν όλοι οι πυρήνες συγκροτούνται από αριθμό νετρονίων μεγαλύτερο του αριθμού των πρωτονίων ($N > Z$) και ότι οι ευσταθείς πυρήνες εμφανίζονται μέσα σε μία στενή σχετικά ζώνη. Όσο τα στοιχεία γίνονται βαρύτερα, τόσο απομακρυνόμαστε από την ισότητα πρωτονίων - νετρονίων. Για τους ευσταθείς πυρήνες με μικρό ατομικό αριθμό (ελαφροί πυρήνες), ο λόγος N/Z έχει τιμή περίπου ίση προς 1, ενώ για μεγάλους ατομικούς αριθμούς (βαρείς πυρήνες), ο λόγος N/Z αυξάνει, αυξανόμενου του Z και τείνει προς την τιμή 1.6. Φαίνεται ότι, η «περίσσεια» των νετρονίων που παρατηρείται στους βαρείς πυρήνες έχει ιδιαίζουσα σημασία για την ευστάθεια των πυρήνων αυτών. Η γραφική παράσταση του Σχήματος 1.1 δείχνει, ακόμα ότι όλοι οι σταθεροί πυρήνες εμπίπτουν σε μία στενή ζώνη, την ζώνη σταθερότητας. Πυρήνες που βρίσκονται εκτός της ζώνης αυτής είναι ασταθείς. Αυτοί οι οποίοι βρίσκονται πάνω και αριστερά της εν λόγω ζώνης, έχουν περίσσεια νετρονίων και ως εκ τούτου έχουν τάση να ελαττώσουν την τιμή του λόγου N/Z , πράγμα το οποίο πραγματοποιείται με εκπομπή σωματιδίου β^- , ή σπανιότερα με εκπομπή νετρονίου. Οι πυρήνες, που βρίσκονται κάτω και δεξιά της ζώνης σταθερότητας, έχουν περίσσεια πρωτονίων, ή έλλειψη νετρονίων και ως εκ τούτου έχουν τάση να αυξήσουν την τιμή του λόγου N/Z , πράγμα το οποίο πραγματοποιείται με εκπομπή σωματιδίου β^+ , ή σύλληψη ηλεκτρονίου (από το φλοιό K του ατόμου στο οποίο ανήκει ο πυρήνας).



Σχήμα 1: Χάρτης του Segre

Στο Σχήμα 2 δείχνεται ένα τμήμα του χάρτη νουκλιδίων με δεδομένα για τα ισότοπα του τιτανίου, μέχρι το ουράνιο. Ο **χάρτης** αυτός των **νουκλιδίων** (τα ισότοπα, που ξεπερνούν

τα χίλια) είναι για τους Φυσικούς, ότι ο **περιοδικός πίνακας του Mendeleev** για τους Χημικούς.



Σχήμα 2: Τμήμα του χάρτη νουκλιδίων

Ο αριθμός των ατόμων ανά μονάδα όγκου N_V (atoms/cm³) για το ν-οστό ισότοπο δίνεται από τη σχέση:

$$N_V = \frac{N_A \cdot \rho \cdot x_V}{100 \cdot AB} \quad [12]$$

Όπου:

- N_A = ο αριθμός του Avogadro, ρ είναι η πυκνότητα του υλικού μέσα στο οποίο βρίσκεται το ισότοπο σε g/cm³
- x = η εκατοστιαία σύσταση σε άτομα του ν-οστού ισοτόπου
- AB = το ατομικό βάρος σε g.

Σε μερικές πυρηνικές εφαρμογές ή ισοτοπική σύνθεση πρέπει ν' αλλάξει π.χ. να γίνει εμπλουτισμός ενός ισοτόπου από ένα άλλο. Σ' αυτήν την περίπτωση ο N_V (atoms/cm³) του ν-οστού ισοτόπου δίνεται από τη σχέση:

$$N_V = \frac{N_A \cdot \rho \cdot z_V}{100 \cdot AB_V} \quad [13]$$

Όπου:

- z_V = η εκατοστιαία σύσταση κατά βάρος του ν-οστού ισοτόπου με το οποίο έχει εμπλουτισθεί το στοιχείο
- ρ = η πυκνότητα του στοιχείου το οποίο εμπλουτίζεται με το ν-οστό ισότοπο
- AB_V = το ατομικό βάρος σε g του ν-οστού ισοτόπου.

Για παράδειγμα εάν σ ένα πυρηνικό αντιδραστήρα το καύσιμο αποτελείται από 1,000 kg ράβδους ουρανίου που έχουν εμπλουτιστεί με 10% κ. β. $^{235}_{92}\text{U}$, τότε το $z_v = 10$. Το δε βάρος του ισотоπυ $^{235}_{92}\text{U}$ είναι $0.10 \cdot 1,000 = 100\text{kg}$.

Έλλειμμα Μάζας - Ενέργεια Σύνδεσης

Ο πυρήνας αποτελείται μόνο από πρωτόνια και νετρόνια. Συνεπώς, κανονικά θα έπρεπε η μάζα του να ισούται με το άθροισμα των μαζών των πρωτονίων και των νετρονίων που συνιστούν τον πυρήνα. Τα πειραματικά όμως αποτελέσματα δείχνουν ότι η μάζα του πυρήνα είναι μικρότερη από το άθροισμα αυτό, παρατηρείται δηλαδή μια διαφορά Δm που ονομάζεται **έλλειμμα μάζας**. Για παράδειγμα ο πυρήνας του χρυσού, $^{197}_{79}\text{Au}$ έχει 79 πρωτόνια και 118 νετρόνια. Η μάζα του πυρήνα του θα έπρεπε να είναι:

$$(118 \cdot 1.008665 \text{ a.m.u.}) + (79 \cdot 1.007277 \text{ a.m.u.}) = 198.597353 \text{ a.m.u.}$$

Όμως, απευθείας μετρήσεις δίδουν μια τιμή 196.9232 a.m.u., δηλαδή υπάρχει έλλειμμα μάζας 1.6741 a.m.u. ή 0.843% του αρχικού πυρήνα. Όλοι οι πυρήνες (εκτός του ^1_1H) έχουν κάποιο έλλειμμα μάζας, δηλαδή κάθε ένα νουκλεόνιο έχει μικρότερη μάζα όταν είναι μέρος ενός πυρήνα από ότι όταν είναι απομονωμένο.

Η εξήγηση του γεγονότος αυτού έχει ως εξής: Έστω Α νουκλεόνια τα οποία συγκροτούν ένα πυρήνα. Τα νουκλεόνια του πυρήνα βρίσκονται σε κατάσταση ευσταθέστερη από εκείνη όπου τα Α νουκλεόνια είναι ελεύθερα σε άπειρη απόσταση μεταξύ τους. Ευσταθέστερη κατάσταση σημαίνει κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας, άρα η μάζα οποιουδήποτε πυρήνα είναι μικρότερη από το άθροισμα των μαζών που θα είχαν τα συστατικά του νουκλεόνια σε ελεύθερη κατάσταση, σε συμφωνία με την αρχή της ισοδυναμίας μάζας-ενέργεια κατά Einsteinn. Η διαφορά λοιπόν αυτή Δm (έλλειμμα μάζας) είναι ισοδύναμη με την ενεργειακή διαφορά ανάμεσα στις δύο καταστάσεις:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 \quad [14]$$

Όπου:

c η ταχύτητα του φωτός.

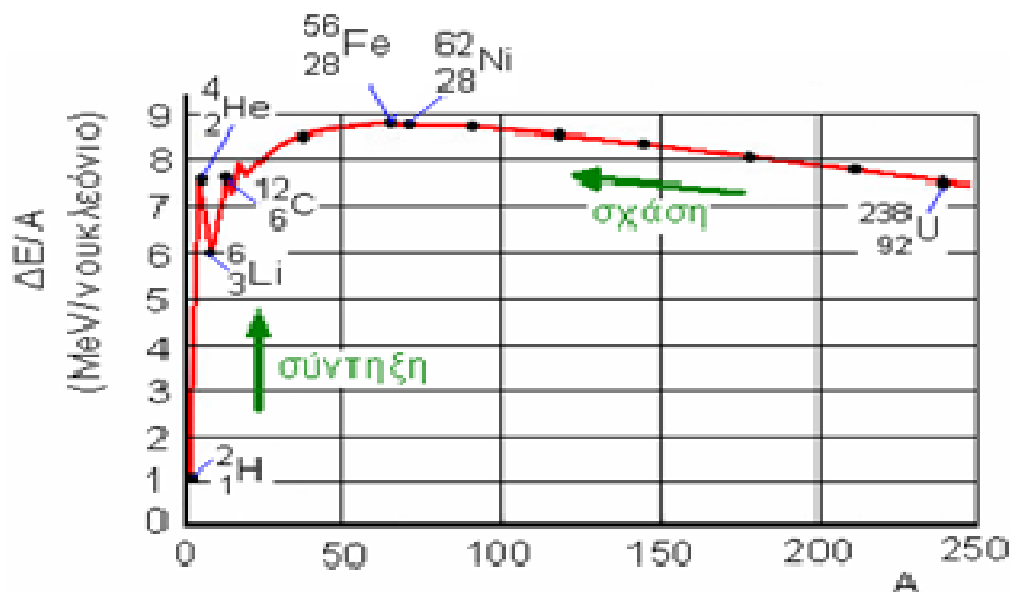
Το μεγαλύτερο έλλειμμα μάζας το έχει το στοιχείο του σιδήρου $^{56}_{26}\text{Fe}$.

Η ενέργεια ΔE ελευθερώνεται κατά το σχηματισμό του πυρήνα από τα συστατικά του νουκλεόνια με αποτέλεσμα τη μειωμένη μάζα του πυρήνα. Η ίδια ενέργεια πρέπει να προσδοθεί στον πυρήνα για να αποσυντεθεί στα συστατικά του νουκλεόνια. Ονομάζεται γι' αυτό **ενέργεια σύνδεσης (binding energy)** του πυρήνα. Προφανώς, το έλλειμμα μάζας και η ενέργεια σύνδεσης είναι όροι που εκφράζουν το ίδιο μέγεθος με διαφορετικές μονάδες. Η ενέργεια σύνδεσης του πυρήνα είναι η αναγκαία ενέργεια που χρειάζεται για να κρατηθούν τα σωματίδια μέσα στον πυρήνα. Είναι γνωστό ότι ένας πυρήνας αποτελείται από πρωτόνια και νετρόνια. Τα πρωτόνια λόγω του ομωνύμου φορτίου απωθούνται μεταξύ τους και επομένως ο πυρήνας θα έπρεπε να διασπασθεί, αλλά αντίθετα μεγάλος αριθμός πυρήνων παρουσιάζει μεγάλη ευστάθεια. Όπως θα δούμε το $^{238}_{92}\text{U}$ μολονότι έχει 92 πρωτόνια εν τούτοις δε διασπάται παρά μόνο με ταχεία νετρόνια.

Το έλλειμμα μάζας ενός πυρήνα μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από τα ατομικά βάρη των στοιχείων. Τα συστατικά σωματίδια ενός νουκλιδίου (Z, A) είναι Z πρωτόνια, Z ηλεκτρόνια και $N=A-Z$ νετρόνια. Οι μάζες πρωτονίων και ηλεκτρονίων μπορούν να συνδυαστούν στη μάζα Z ατόμων υδρογόνου, αφού η διαφορά μάζας κατά το σχηματισμό του ατόμου του υδρογόνου είναι ασήμαντη. Έτσι, αν $m_H, m_n, m_{Z,A}$, είναι οι μάζες υδρογόνου, ελευθέρου νετρονίου και του ατόμου (Z, A) αντίστοιχα, το έλλειμμα μάζας είναι:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{Z,A} \quad \text{ή} \quad \Delta m = Zm_H + (A - Z)m_n - m_{Z,A} \quad [15]$$

Από όπου υπολογίζεται με την κατάλληλη σχέση η ενέργεια σύνδεσης του πυρήνα (Z, A) και η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο: $\Delta E/A$. Η $\Delta E/A$ των φυσικών πυρήνων δίνεται στο Σχήμα 3 ως συνάρτηση του μαζικού αριθμού A των πυρήνων.



Σχήμα 3: Ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο ($\Delta E/A$) συναρτήσει του μαζικού αριθμού A

Η ενέργεια σύνδεσης του ^1_1H είναι προφανώς μηδέν. Από την τιμή αυτή η $\Delta E/A$ αυξάνεται γρήγορα και για τους περισσότερους πυρήνες είναι της τάξης των 8 MeV/νουκλεόνιο. Η καμπύλη έχει ένα αρκετά πλατύ μέγιστο 8.7 MeV/νουκλεόνιο από $A=50$ έως 130. Καθώς προχωρούμε σε πυρήνες με μεγαλύτερο A η $\Delta E/A$ μειώνεται αργά μέχρι την τιμή των 7.5 MeV/νουκλεόνιο περίπου για τα ισότοπα του ουρανίου. Η καμπύλη του διαγράμματος παρουσιάζει μέγιστο περίπου στον πυρήνα του $^{56}_{26}\text{Fe}$. Δεξιά του μέγιστου έχουμε παραδείγματα σχάσης από τα βαριά μέταλλα με $A > 90$. Με την ίδια λογική από τα αριστερό του μέγιστου έχουμε παραδείγματα σύντηξης ελαφρών πυρήνων για να δώσουν βαρύτερους (μέχρι τον πυρήνα του $^{56}_{26}\text{Fe}$). Φυσικά, οι πολύ ελαφριοί πυρήνες παρουσιάζουν πρακτικό ενδιαφέρον. Παρατηρούμε μάλιστα ότι λόγω της δραματικής κλίσης της καμπύλης, το «ενεργειακό κέρδος» από τη μεγάλη κλίση της καμπύλης είναι πολύ μεγαλύτερο στη σύντηξη παρά στην σχάση.

Η μορφή αυτή της καμπύλης δίδει σημαντική πληροφορία σχετικά με τη φύση των πυρηνικών δυνάμεων και τη δομή των πυρήνων. Αυτό που ενδιαφέρει εδώ είναι οι διαφορές των $\Delta E/A$ των διαφόρων πυρήνων. Η $\Delta E/A$ των πυρήνων μέσου βάρους είναι μεγαλύτερη

από την $\Delta E/A$ των βαρέων πυρήνων. Δηλαδή, το έλλειμμα μάζας ανά νουκλεόνιο $\Delta m/A$ των πυρήνων μέσου βάρους είναι μεγαλύτερο από το $\Delta m/A$ των βαρέων πυρήνων.

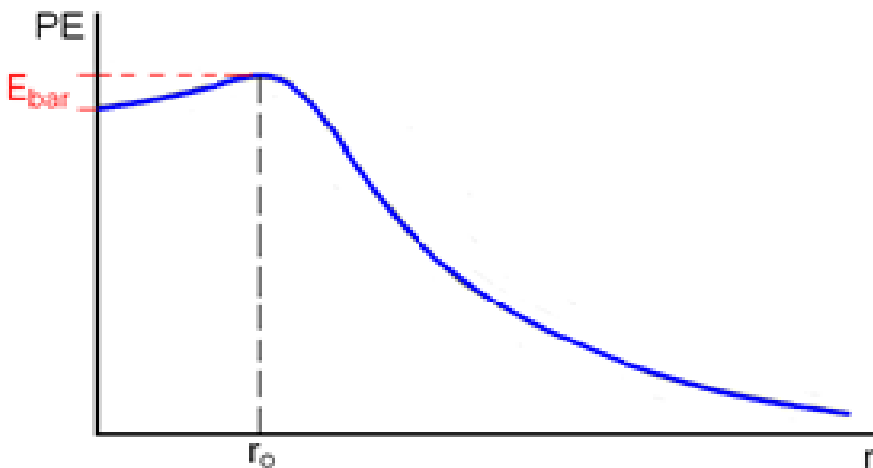
Έστω οι εξής καταστάσεις:

A. σύστημα των νουκλεονίων ενός βαρέος πυρήνα με $A=238$ π.χ. U-238

B. δύο ανεξάρτητοι ισοβαρείς πυρήνες με 238 νουκλεόνια, καθένας με $A=119$.

Το έλλειμμα μάζας Δm της B κατάστασης είναι μεγαλύτερο από το Δm της A. Αν λοιπόν, με κάποιο τρόπο, το U-238 τεμαχιστεί στους δύο πυρήνες ενδιάμεσου βάρους, θα γίνει απελευθέρωση ενέργειας ισοδύναμης με τη διαφορά των Δm της A από τη B κατάσταση, θα γίνει δηλαδή απελευθέρωση ενέργειας ίσης με τη διαφορά των ενεργειών σύνδεσης. Η διαφορά των ενεργειών σύνδεσης στο παράδειγμα αυτό είναι περίπου $0.84\text{MeV}/\text{νουκλεόνιο}$ και έτσι σε μια τέτοια σχάση απελευθερώνεται ενέργεια $E=238 \cdot 0.84 \approx 200\text{MeV}$. Ωστε κατά τη σχάση βαρέων πυρήνων πραγματοποιείται αύξηση του ελλείμματος μάζας, δηλαδή μετατροπή ενέργειας από ενέργεια μάζας σε κινητική ενέργεια των προϊόντων της σχάσης. Αυτή είναι η προέλευση της ενέργειας στους πυρηνικούς αντιδραστήρες σχάσης. Σχετικά τώρα με τις πιθανότητες πραγματοποίησης της σχάσης, ας ξανακοιτάξουμε το σύστημα των 238 νουκλεονίων στις δύο καταστάσεις που αναφέραμε παραπάνω. Το γεγονός ότι η $\Delta E/A$ των πυρήνων μέσου βάρους είναι μεγαλύτερη από την $\Delta E/A$ του βαρέος πυρήνα σημαίνει ότι η B κατάσταση είναι κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας, δηλαδή ευσταθέστερη της A. Αυτό πάλι σημαίνει, από ενεργειακή άποψη, ότι η σχάση είναι πράγματι δυνατή και η φυσική πορεία είναι συνεχής μετατροπή (σχάση) των βαρέων πυρήνων στην ευσταθέστερη κατάσταση των πυρήνων μέσου βάρους.

Τίθεται τώρα το ερώτημα, γιατί δεν έχουν ακόμα εξαφανιστεί οι βαρείς πυρήνες π.χ. του ουρανίου. Ας θεωρήσουμε τα A νουκλεόνια του πυρήνα σε δύο συστήματα, καθένα με $A/2$ νουκλεόνια κι ας κοιτάξουμε τη δυναμική ενέργεια του συστήματος των δύο αυτών συγκροτημάτων ως συνάρτηση της μεταξύ των απόστασης (Σχήμα 4).



Σχήμα 4: Δυναμική ενέργεια PE του συστήματος δύο πυρήνων - προϊόντων της σχάσης, ως συνάρτηση της μεταξύ των απόστασης r

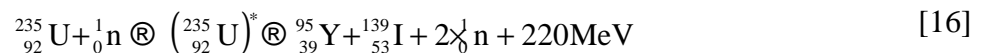
Όταν η απόσταση αυτή είναι της τάξης της ακτίνας r_0 του βαρέος πυρήνα, τα νουκλεόνια βρίσκονται στην κατάσταση «βαρύς πυρήνας», δηλαδή στην A κατάσταση, κι' όταν η απόσταση αυτή είναι άπειρη, τα νουκλεόνια βρίσκονται στη B κατάσταση. Σε αποστάσεις μεγαλύτερες από την r_0 επικρατούν οι απωστικές ηλεκτροστατικές δυνάμεις και η δυναμική ενέργεια μεγαλώνει όσο η απόσταση των δύο συγκροτημάτων μικραίνει. Σε αποστάσεις της τάξης της ακτίνας του βαρέος πυρήνα οι ελκτικές πυρηνικές δυνάμεις είναι πολύ μεγαλύτερες από τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις, η δυναμική ενέργεια μικραίνει με τη

μείωση της απόστασης και σχηματίζεται έτσι το φράγμα δυναμικού E_{bar} , το βάθος του είναι συνήθως 6-9MeV. Παρατηρούμε πως η χαμηλότερη ενέργεια του συστήματος είναι πράγματι αυτή της Βκατάστασης, όπου τα δύο συγκροτήματα βρίσκονται σε άπειρη απόσταση. Το φράγμα δυναμικού όμως εμποδίζει τη σχάση, δηλαδή εμποδίζει τη μετάβαση στην κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας. Αν με κάποιο τρόπο δοθεί στον πυρήνα ενέργεια μεγαλύτερη από το φράγμα αυτό, τότε η πιθανότητα πραγματοποίησης της σχάσης είναι μεγάλη. Σύμφωνα με την κλασική μηχανική, χωρίς πρόσδοση στον πυρήνα ενέργειας μεγαλύτερης από το φράγμα δυναμικού, δεν είναι δυνατή η σχάση. Σύμφωνα όμως με την κβαντομηχανική υπάρχει μικρή, αλλά πεπερασμένη, πιθανότητα να διασπαστεί ο πυρήνας χωρίς να του δοθεί ενέργεια, χωρίς εξωτερική διέγερση. Πράγματι, τέτοια αυθόρμητη σχάση παρατηρείται σε βαρείς πυρήνες, η πιθανότητα όμως αυθόρμητης σχάσης είναι εξαιρετικά μικρή, όπως προκύπτει από τους αντίστοιχους χρόνους ημιζωής για αυθόρμητη σχάση $1.8 \cdot 10^{17}$ y το U-235, $8 \cdot 10^{15}$ y το U-238, $5.5 \cdot 10^{15}$ y το Pu-239 και $1.2 \cdot 10^{11}$ y το Pu-240.

Αν προσδοθεί στον πυρήνα ενέργεια (όχι αναγκαστικά μεγαλύτερη από το φράγμα), η πιθανότητα σχάσης αυξάνεται και είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια διέγερσης. Αυτή η αύξηση της πιθανότητας είναι πολύ μικρή μέχρι κάποια κρίσιμη ενέργεια διέγερσης, όπου η πιθανότητα σχάσης αυξάνεται απότομα. Μπορούμε λοιπόν να πούμε ότι η διαδικασία της σχάσης έχει κάποιο κατώφλι ενέργειας. Σημειώνεται ότι με τη συνηθισμένη χρήση του όρου κατώφλι ενέργειας, δηλαδή ενέργεια διέγερσης κάτω από την οποία σχάση δεν είναι δυνατή, τέτοιο κατώφλι στη σχάση όπως είπαμε δεν υπάρχει. Πυρήνας σε κατάσταση διέγερσης κάτω από το κατώφλι έχει εξαιρετικά μικρή πιθανότητα αποδιέγερσης με σχάση, αντίθετα αν ο πυρήνας διεγερθεί σε ενέργεια πάνω από το κατώφλι, ο πιθανότερος τρόπος αποδιέγερσής του είναι με σχάση. Το κατώφλι ενέργειας για πυρήνες βαρύτερους από το Th-233 είναι της τάξης των 5-6MeV, ενώ για ελαφρύτερους πυρήνες είναι πολύ μεγαλύτερο (π.χ. για το Pb είναι 20MeV).

Διέγερση του πυρήνα σε ενέργειες μεγαλύτερες από το κατώφλι σχάσης μπορεί να γίνει με φωτόνια γ . Η αντίστοιχη σχάση ονομάζεται **φωτοσχάση**. Η ενέργεια όμως των φωτονίων γ που παράγονται στους αντιδραστήρες, πολύ σπάνια είναι μεγαλύτερη από 4MeV κι έτσι η φωτοσχάση δεν αποτελεί σημαντικό φαινόμενο στους πυρηνικούς αντιδραστήρες.

Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος να βρεθεί βαρύς πυρήνας σε κατάσταση διέγερσης με μεγάλη πιθανότητα σχάσης είναι να **απορροφήσει ένα νετρόνιο στον πυρήνα**. Προκύπτει έτσι από τον αρχικό πυρήνα μαζικού αριθμού A ένας καινούργιος πυρήνας, ο «**σύνθετος πυρήνας**» μαζικού αριθμού A+1, με ενέργεια διέγερσης ίση με το άθροισμα της κινητικής ενέργειας και της ενέργειας σύνδεσης του νετρονίου βλήματος. Αυτός, ο σύνθετος πυρήνας, είναι που παθαίνει τη **σχάση, (fission)**:



Για ορισμένα ισότοπα (U-233, U-235, Pu-239, Pu-241) η ενέργεια σύνδεσης του νετρονίου είναι αρκετή μόνη της, χωρίς την κινητική ενέργεια του νετρονίου, για να προκαλέσει σχάση. Είναι έτσι δυνατή η σχάση με νετρόνια ασήμαντης κινητικής ενέργειας. Τα ισότοπα αυτά ονομάζονται **σχάσιμα** και από αυτά μόνο **το U-235 βρίσκεται στη φύση** σε αξιόλογες ποσότητες, τα υπόλοιπα τρία είναι κατασκευάσματα του ανθρώπου. Για τη σχάση άλλων ισωτόπων, όπως το Th-232 και το U-238, το νετρόνιο πρέπει να έχει κινητική ενέργεια μεγαλύτερη κάποιας τιμής, της τάξης των 1.5MeV. Τα νετρόνια λοιπόν είναι που προκαλούν τις σχάσεις στους πυρηνικούς αντιδραστήρες και έτσι οι αντιδράσεις της ύλης με νετρόνια και ειδικότερα η τύχη του νετρονικού πληθυσμού στον αντιδραστήρα είναι το κεντρικό θέμα της θεωρίας των αντιδραστήρων.

Πριν προχωρήσουμε στις αντιδράσεις με νετρόνια, δύο λόγια για τη **σύντηξη (fusion)** ελαφρών πυρήνων. Στην καμπύλη της ενέργειας σύνδεσης ανάνουκλεόνιο ΔE/A

παρατηρούμε ότι η $\Delta E/A$ του ${}^4_2\text{He}$ είναι μεγαλύτερη από αυτήν των ισοτόπων του υδρογόνου. Έτσι κατά τη σύντηξη δύο ελαφρών πυρήνων σε πυρήνα ${}^4_2\text{He}$ έχουμε πάλι έκλυση ενέργειας:



Αυτή είναι η πηγή της ενέργειας στα αστέρια, όπως ο ήλιος και η βόμβα υδρογόνου. Για να πραγματοποιηθεί όμως η σύντηξη πρέπει οι ελαφροί πυρήνες να συγκρουστούν με κολοσσιαία ενέργεια, ώστε να υπερνικήσουν τη δύναμη Coulomb. Τέτοιες κινητικές ενέργειες αντιστοιχούν σε θερμοκρασία της τάξης των 10^8K . Ελεγχόμενη αντίδραση σύντηξης από τον άνθρωπο δεν έχει ακόμα πραγματοποιηθεί ούτε έχει αποδειχθεί ότι είναι πραγματοποιήσιμη.

Συμπερασματικά, από το Σχήμα 4 φαίνεται ότι όταν ένας βαρύς πυρήνας διασπάται ή όταν δύο ελαφροί πυρήνες συντήκονται, τότε η ενέργεια συνδέσεως ανά νουκλεόνιο στους παραγόμενους πυρήνες αυξάνει, δηλαδή οι παραγόμενοι πυρήνες είναι περισσότερο σταθεροί από τους αντιδρώντες. Και στις δύο αυτές αντιδράσεις ελευθερώνεται ενέργεια, η οποία ισούται με τον αριθμό των νουκλεονίων επί τη διαφορά της ενέργειας συνδέσεως ανά σωματίδιο των προϊόντων και των αντιδρώντων.

Ερώτημα:

Τι είναι λοιπόν αυτό που καθορίζει τις ενέργειες σύνδεσης; Ή καλύτερα πως δικαιολογείται το διάγραμμα του Σχήματος 4;

Όλα εξαρτώνται από την αλληλεπίδραση μεταξύ των ηλεκτροστατικών (δυνάμεις Coulomb) με τις πυρηνικές δυνάμεις (nuclear ή strong forces). Τα θετικά φορτισμένα πρωτόνια απωθούν το ένα το άλλο. Η ηλεκτροστατική δύναμη είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης, δηλαδή η δύναμη αυτή μειώνεται με το τετράγωνο της απόστασης των φοτισμένων σωματιδίων. Εάν η απόσταση μεταξύ δυο πρωτονίων διπλασιαστεί ή δεκαπλασιαστεί, η δύναμη αυτή υποτετραπλασιάζεται ή πέφτει στο ένα εκατοστό της, αντίστοιχα. Τα μεγέθη βέβαια των ατομικών πυρήνων είναι αρκετά μικρά και ουσιαστικά όλα τα πρωτόνια μπορούν να (αισθανθούν) την απώθησή τους από όλα τα άλλα. Η ηλεκτροστατική ενέργεια εξαιτίας όλων αυτών των απωθητικών δυνάμεων αναπτύσσεται χωρίς όριο καθώς ο πυρήνας γίνεται όλο και μεγαλύτερος. Από την άλλη πλευρά, η πυρηνική δύναμη είναι μια αλληλεπίδραση μικρής εμβέλειας και συγκεκριμένα είναι αποτελεσματική για αποστάσεις νουκλεονίων μικρότερες από $2 \cdot 10^{-15}\text{m}$ αλλά και τεράστιας εντάσεως. Μέσα στον πυρήνα, τα πρωτόνια και νετρόνια «αισθάνονται» αυτή τη δύναμη μόνο εξαιτίας των άμεσα γειτόνων τους. Είναι ενδιαφέρον να σημειώσουμε ότι η ελκτική αυτή δύναμη είναι η ίδια είτε πρόκειται για νετρόνια είτε για πρωτόνια. Για αυτήν την ελκτική δύναμη μπορούμε να μιλάμε για νουκλεόνια (και όχι ειδικά για νετρόνια ή πρωτόνια). Μέσα στον πυρήνα, τα νουκλεόνια περιστοιχίζονται από άλλα νουκλεόνια, αλλά τα νουκλεόνια που υπάρχουν στην εξωτερική επιφάνεια έχουν γειτονικά μόνο από την μία πλευρά. Ένας μεγάλος πυρήνας, με περισσότερο χώρο στο εσωτερικό του σε σχέση με την εξωτερική επιφάνεια του, έχει συγκριτικά περισσότερους ελκτικούς δεσμούς και έτσι η ισχυρή ελκτική πυρηνική δύναμη σύνδεσης αυξάνει με το μέγεθος του πυρήνα (έως ένα σημείο όμως ...). Γιατί όσο μεγαλώνει ο πυρήνας μπορεί να αυξάνουν οι απωθητικές δυνάμεις εξαιτίας των πρωτονίων αλλά αρχίζουν να μειώνονται οι ελκτικές δυνάμεις των νουκλεονίων λόγω της αύξησης της εξωτερικής επιφάνειας του πυρήνα.

Καθώς ο ατομικός αριθμός και ο μαζικός αριθμός αυξάνει, οι απωστικές ηλεκτροστατικές δυνάμεις μέσα στον πυρήνα αυξάνονται εξαιτίας του αυξανόμενου αριθμού πρωτονίων μέσα στο πυρήνα. Προκειμένου να ξεπεραστεί αυτή η αυξημένη απώθηση, η

αναλογία των νετρονίων στον πυρήνα πρέπει να αυξηθεί για να επιτευχθεί σταθερότητα. Αυτή η αύξηση στο λόγο νετρονίων / πρωτονίων μερικώς μόνο εξισορροπεί την αυξανόμενη απώθηση μεταξύ των πρωτονίων στα βαριά στοιχεία.

Επειδή αυξάνονται οι απωθητικές δυνάμεις, λιγότερη ενέργεια πρέπει να χορηγηθεί ώστε να αφαιρεθεί ένα νουκλεόνιο από τον πυρήνα. Η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο είναι μια ένδειξη της σταθερότητας του πυρήνα. Γενικά, οι πιο σταθεροί πυρήνες έχουν μεγαλύτερη ενέργεια σύνδεσης από τους ασταθείς. Η αύξηση της ενέργειας σύνδεσης από το μαζικό αριθμό 260 μέχρι το 60 είναι ο πρώτος λόγος για την απελευθέρωση ενέργειας κατά τη σχάση.

Επιπροσθέτως, η αύξηση της ενέργειας σύνδεσης από το 1 έως το 60 είναι ο λόγος για την απελευθέρωση ενέργειας στην σύντηξη. Με άλλα λόγια, καθώς κινούμαστε από πυρήνες χαμηλού μαζικού αριθμού προς βαρύτερους πυρήνες βλέπουμε ότι όσο περισσότερα πρωτόνια προστίθενται στον πυρήνα τόσο περισσότερα νετρόνια χρειάζονται για να συνδέσουν τα πρωτόνια μεταξύ τους (ώστε οι ελκτικές δυνάμεις των νουκλεονίων να υπερνικούν τις απωστικές μεταξύ των πρωτονίων) αλλά και όσο μεγαλώνει ο πυρήνας τόσο απομακρύνονται τα πρωτόνια και τόσο λιγότερη αποτελεσματική γίνεται η πυρηνική δύναμη. Η ηλεκτροστατική δύναμη είναι μεγαλύτερης εμβέλειας από την πυρηνική δύναμη. Τελικά ο χωρισμός των πρωτονίων γίνεται πολύ μεγάλος και οι ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις δεν μπορούν να ισοσκελισθούν τις απωθητικές δυνάμεις. Οι πυρήνες με ατομικούς αριθμούς >83 αρχίζουν να αποσυντίθενται αυθόρμητα και εκπέμπουν σωματίδια που ονομάζονται **ακτινοβολία**.

Αυτές οι δυο συνεισφορές δυνάμεων έχουν αντίθετα αποτελέσματα, ένα ελκτικό και ένα απωθητικό. Το ολικό αποτέλεσμα είναι ότι η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο αυξάνει, έως ότου φθάσουμε σε ένα σημείο (το στοιχείο του σιδήρου) όπου αρχίζει να μειώνεται η καθαρή δύναμη που συνδέει τον πυρήνα και έτσι η ενέργεια σύνδεσης αρχίζει να μειώνεται με αργούς που ρυθμούς. Αυτό σημαίνει ότι τα στοιχεία βαρύτερα του σιδήρου δεν μπορούν να υποστούν σύντηξη και εάν γίνει κάτι τέτοιο θα πρέπει να σπαταληθεί περισσότερη ενέργεια από όση θα παρήγαγαν. Τα στοιχεία με την υψηλότερη ενέργεια σύνδεσης βρίσκονται στην πιο σταθερή κατάσταση διότι εφόσον έχουν υψηλή ενέργεια σύνδεσης, απαιτούν αναλογικά πολύ μεγαλύτερη ενέργεια για να κατακερματιστούν. Στην φύση όλα τείνουν προς τις σταθερότερες καταστάσεις.

Παρατηρώντας και πάλι το διάγραμμα της ενέργειας σύνδεσης παρατηρούμε ότι από τα αριστερά μπορούμε να κινηθούμε προς δεξιά και συγκεκριμένα προς το μέγιστο (στοιχείο του σιδήρου) ως εξής:

Δύο ελαφρύς πυρήνες μπορούν να υποστούν σύντηξη προς ένα βαρύτερο διότι η ενέργεια σύνδεσης του βαρύτερου πυρήνα είναι μεγαλύτερη και έτσι οδεύουμε προς σταθερότερη κατάσταση. Το προκύπτουν έλλειμμα μάζας είναι η ενέργεια της σύντηξης. Για να επιτύχει η **σύντηξη** θα πρέπει οι δυο πυρήνες να έλθουν σε στενή επαφή και για αυτό το λόγο πρέπει να σπαταληθεί ενέργεια ώστε να υπερνικηθούν οι απωστικές δυνάμεις των δυο θετικά φορτισμένων πυρήνων. Η πιο εύκολη περίπτωση για να γίνει κάτι τέτοιο έχει να κάνει με τους μικρότερους δυνατών πυρήνες που υπάρχουν στη φύση, δηλαδή του υδρογόνου. Η σύντηξη του υδρογόνου προς ήλιο είναι το πλέον κατανοητό παράδειγμα. Συνεχίζοντας μπορούμε «θεωρητικά» να φανταστούμε ότι συντήκονται πυρήνες μέχρι να φθάσουμε στη πλέον σταθερή κατάσταση, το στοιχείο του σιδήρου. Στα αστέρια μεγάλης ηλικίας, όπου η σύντηξη συμβαίνει ασταμάτητα, η συσσώρευση πυρήνων σιδήρου είναι το τελικό στάδιο.

Το στοιχείο του σιδήρου όμως μπορεί να προσεγγιστεί και από την δεξιά πλευρά. Ο πυρήνας του ουρανίου μπορεί να διασπαστεί από νετρόνια χαμηλής ενέργειας και να προκύψουν δυο θραύσματα με υψηλότερη ενέργεια σύνδεσης, δηλαδή μια σταθερότερη κατάσταση.

Οι μεγάλοι πυρήνες με μαζικό αριθμό >200 και ατομικό αριθμό >90 είναι ευκολότερο να υποστούν **σχάση** από ότι οι ελαφροί πυρήνες να υποστούν σύντηξη διότι η ενέργεια ενεργοποίησης των είναι πολύ χαμηλότερη.

Η καμπύλη της ενέργειας σύνδεσης κρύβει και μερικό αλλά απρόοπτα φαινόμενα. Μολονότι είναι ομαλή σε γενικές γραμμές και παρουσιάζει ένα μέγιστο (πυρήνας σιδήρου), εμφανίζεται ένα σχετικό μέγιστο στα αριστερά της καμπύλης. Πρόκειται για το πυρήνα του ηλίου που δείχνει να είναι εξαιρετικά σταθερός σε σχέση με το λίθιο ή το βηρύλλιο. Ο λόγος είναι ότι ο πυρήνας του ηλίου έχει δυο ζευγάρια νουκλεονίων (δυο πρωτόνια και δυο νετρόνια) που το καθιστούν ιδιαίτερα σταθερό και λίαν αποδοτικό σε ενέργεια εάν προκύψει από τη σύντηξη πυρήνων υδρογόνου. Η υψηλή σταθερότητα τέτοιων πυρήνων έχει παρατηρηθεί και για άλλους πυρήνες όπως για παράδειγμα τους τρεις «πρωταθλητές σταθερότητας» δηλαδή τους πυρήνες $^{56}_{26}\text{Fe}$, $^{56}_{28}\text{Fe}$ και $^{62}_{28}\text{Ni}$.

Οι βαρείς πυρήνες εάν υποστούν ακόμα και μια μικρή διαστροφή από το σφαιρικό τους σχήμα (δηλαδή μια μικρή προσθήκη ενέργειας) υφίστανται μεγάλες απωθητικές τάσεις εξαιτίας των ηλεκτροστατικών δυνάμεων που ασκούνται στα δυο μισά του πυρήνα. Οι δυνάμεις αυτές είναι ικανές να ξεπεράσουν τις ελκτικές δυνάμεις που συγκρατούν τα δυο μισά μέρη και να συντελεστεί η διάσπαση των πυρήνων.

Παρατήρηση: Από τα παραδείγματα αυτά φαίνεται ότι τόσο η συγκρότηση ενός πυρήνα από τα συστατικά του, όσο και η προσθήκη ενός νουκλεονίου σε ένα πυρήνα αποδίδει σχετικά μεγάλο ποσό ενέργειας συγκριτικά με τις ενέργειες που εκλύονται κατά τις χημικές αντιδράσεις, όπου π.χ. κατά τη καύση ενός ατόμου άνθρακα σύμφωνα με την αντίδραση: $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ εκλύεται ποσό ενέργειας, της τάξης των 4eV !

Πυρηνικές Δυνάμεις

Οι δυνάμεις που εξασκούνται μέσα στον πυρήνα μεταξύ των σωματιδίων όταν βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ τους $<10^{-15}\text{m}$ είναι οι **πυρηνικές δυνάμεις** και είναι υπεύθυνες για την συγκρότησή του. Η πυρηνική δύναμη μεταξύ δύο πρωτονίων ή δύο νετρονίων ή μεταξύ πρωτονίου-νετρονίου είναι ίδια. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά (ιδιότητες) των πυρηνικών δυνάμεων είναι τα εξής:

1. **Είναι ισχυρές.** Είναι υπεύθυνες για τις ισχυρές αλληλεπιδράσεις, για την εκπομπή των ακτίνων άλφα από τον πυρήνα. Είναι οι πλέον ισχυρές από όλα τα είδη δυνάμεων που υπάρχουν στη φύση. Είναι ισχυρότερες από τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις Coulomb, γι' αυτό τα πρωτόνια βρίσκονται πολύ κοντά το ένα με το άλλο μέσα στον πυρήνα. Αν κοιτάξουμε τον πυρήνα σε σχέση με τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις, βλέπουμε ότι οι απωστικές δυνάμεις ανάμεσα στα θετικά φορτισμένα πρωτόνια, που τείνουν να αποσυνθέσουν τον πυρήνα στα συστατικά του, είναι κολοσσιαίες. Δύο εφαπτόμενα πρωτόνια απωθούνται με δύναμη περίπου $6 \cdot 10^7 \text{N} = 6 \cdot 10^3$ τόνων. Η δύναμη αυτή εάν εφαρμοστεί στη μάζα του πρωτονίου προκαλεί επιτάχυνση 10^{34}m/s^2 . Πρέπει συνεπώς οι πυρηνικές δυνάμεις να είναι τόσο ισχυρές, ώστε να υπερνικούν τις ηλεκτροστατικές και να συγκρατούν τα νουκλεόνια στο μικρό χώρο του πυρήνα. Τέλος, καλούνται ισχυρές λόγω του πολύ μικρού χρόνου δράσης τους, που είναι της τάξης του 10^{-23}s .
2. **Είναι κορέσιμες.** Οι κλασσικές δυνάμεις (δυνάμεις Coulomb και δυνάμεις βαρύτητας) είναι ακόρεστες δυνάμεις. Κάθε σωματίο του πυρήνα, πρωτόνιο ή νετρόνιο, δρα με περιορισμένο αριθμό γειτονικών του σωματιών, καθόσον πρόσθεση

σωματίων, δηλαδή πρωτονίων ή νετρονίων, στον πυρήνα αυξάνει την ενέργεια σύνδεσης, ΔE , του πυρήνα σαν σύνολο, αλλά η μέση ενέργεια σύνδεσης ανά σωματίο (νουκλεόνιο) του πυρήνα, $\Delta E/A$, παραμένει σταθερή, περίπου 8MeV, για τους περισσότερους πυρήνες από $A=50$ μέχρι $A=130$. Η σταθερή πυρηνική πυκνότητα και η εξάρτηση της πυρηνικής ακτίνας (διάσταση του πυρήνα) από την κυβική ρίζα του μαζικού αριθμού A ($R=R_0 \cdot A^{1/3}$) αποτελούν μια ακόμη απόδειξη ότι οι πυρηνικές δυνάμεις είναι κορέσιμες.

3. **Είναι μικρής εμβέλειας.** Για τις πυρηνικές δυνάμεις πρέπει να υπάρχει απωστική συνιστώσα, καθόσον διαφορετικά όλοι οι πυρήνες θα έπρεπε να έχουν το ίδιο περίπου μέγεθος, σε αντίθεση προς τα πειραματικά δεδομένα, τα οποία δίνουν την πυρηνική ακτίνα ανάλογη των πυρηνικών δυνάμεων. Η απωστική συνιστώσα αρχίζει να δρα από το κέντρο του σωματιδίου, πρωτονίου ή νετρονίου, μέχρι περίπου 0.5m ($0.5 \cdot 10^{-13}\text{cm}$) και θα πρέπει να είναι κατά πολύ ισχυρότερη, στην απόσταση αυτή 0.5fm , από την ελκτική συνιστώσα των πυρηνικών δυνάμεων. Η εμβέλεια των πυρηνικών δυνάμεων φθάνει μέχρι λίγα fm. Η πυρηνική ακτίνα είναι της τάξης των 10fm . Έτσι, ένα νετρόνιο που ταξιδεύει μέσα σε ένα υλικό δεν αισθάνεται την παρουσία του πυρήνα παρά μόνο όταν βρεθεί πολύ κοντά του, θα συνεχίσει να ταξιδεύει σε ευθεία γραμμή μέχρις ότου πέσει πάνω στον πυρήνα. Αντίθετα, ένα πρωτόνιο απωθείται από το θετικό φορτίο του πυρήνα αμέσως μόλις διαπεράσει το σύννεφο των ηλεκτρονίων του ατόμου. Σε αποστάσεις σημαντικά μεγαλύτερες από την ακτίνα του πυρήνα η μόνη δύναμη που ασκείται στο πρωτόνιο είναι η ηλεκτροστατική.
4. **Είναι ανεξάρτητες του φορτίου.** Τα σωματία του πυρήνα, πρωτόνια και νετρόνια κινούνται μέσα στον πυρηνικό όγκο, χωρίς να επηρεάζει το ένα το άλλο, ανεξάρτητα από το αν φέρουν φορτίο (πρωτόνια) ή όχι (νετρόνια). Η ενέργεια που απαιτείται για να εξαχθεί ένα πρωτόνιο από τον πυρήνα είναι περίπου η ίδια που απαιτείται για να εξαχθεί ένα νετρόνιο ($\sim 8\text{MeV}$). Γι' αυτό έχουν και κοινή ονομασία, νουκλεόνια, γεγονός που τα κάνει να μην ξεχωρίζουν, όσον αφορά την ιδιότητα αυτή.

Για να γίνει κατανοητό το πόσο ισχυρές, είναι οι πυρηνικές δυνάμεις, θα πρέπει να γίνει σύγκριση με τα άλλα είδη των δυνάμεων που υπάρχουν στη φύση. Συνολικά είναι ως τώρα γνωστά τέσσερα ήδη δυνάμεων:

- **Πυρηνικές δυνάμεις:** όπως παρουσιάστηκαν παραπάνω.
- **Ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις:** είναι 137 φορές ασθενέστερες από τις πυρηνικές δυνάμεις. Δρουν μεταξύ φορτισμένων σωματίων ή σωματίων που έχουν ηλεκτρική ή μαγνητική ροπή. Ακολουθούν τον νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου της απόστασης r :

$$F_C = k \frac{q_1 \times q_2}{r^2} \quad [18]$$

- Είναι δυνάμεις άπειρης εμβέλειας ($1/r^2$). Υπεύθυνες για την ενέργεια σύνδεσης των ηλεκτρονίων στα άτομα και τον σχηματισμό των μορίων. Ο χρόνος δράσης τους είναι της τάξης του 10^{-21}s .
- **Δυνάμεις ασθενούς αλληλεπίδρασης.** Είναι 10^{14} φορές ασθενέστερες από τις πυρηνικές δυνάμεις. Υπεύθυνες για την εκπομπή των ακτίνων βήτα από τον πυρήνα. Η αλληλεπίδραση είναι σημειακή. Ο χρόνος δράσης τους είναι της τάξης του 10^{-8}s .
- **Δυνάμεις βαρύτητας.** Είναι οι πλέον ασθενείς, 10^{39} φορές ασθενέστερες από τις πυρηνικές δυνάμεις. Είναι δυνάμεις ελκτικές, άπειρης εμβέλειας ($1/r^2$) και

ακολουθούν και αυτές, όπως και οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις, τον νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου της απόστασης r :

$$F_G = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2} \quad [19]$$

ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ

Ο πυρήνας του ατόμου είναι ένα κβαντομηχανικό σύστημα νουκλεονίων, αυτό σημαίνει ότι η εσωτερική ενέργεια του πυρήνα δεν μπορεί να έχει οποιαδήποτε τιμή αντίθετα για κάθε είδος πυρήνα υπάρχουν διακριτές επιτρεπόμενες **στάθμες ενέργειας**, χαρακτηριστικές του είδους του πυρήνα. Η κατάσταση με τη μικρότερη από τις επιτρεπόμενες ενέργειες είναι η πιο ευσταθής και γι' αυτό ονομάζεται **θεμελιώδης κατάσταση**. Οι υπόλοιπες καταστάσεις ονομάζονται, και είναι, **καταστάσεις διέγερσης**, αφού αργά ή γρήγορα, με κάποιο τρόπο, ο πυρήνας θα μεταβεί στη θεμελιώδη του κατάσταση ελευθερώνοντας την περίσσεια ενέργεια. Σχετικά μακρόβιες καταστάσεις διέγερσης ονομάζονται **ισομερείς καταστάσεις**.

Πολλοί από τους φυσικούς πυρήνες είναι ασταθείς δηλαδή από μόνοι τους -χωρίς καμιά εξωτερική διέγερση- είτε μετατρέπονται σε κάποιο άλλο πυρήνα εκπέμποντας σωματίδια, ή κάποια νουκλεόνια τους μεταβαίνουν από κάποια στάθμη διέγερσης σε κάποια άλλη χαμηλότερη εκπέμποντας φωτόνια. Μιλάμε τότε για **ραδιενεργό διάσπαση** του ασταθούς πυρήνα. Ο αρχικός (διασπώμενος) πυρήνας ονομάζεται **μητρικός** ενώ τελικός πυρήνας που προκύπτει από τη διάσπαση ονομάζεται **θυγατρικός**.

Τα σωματίδια εκπέμπονται με σημαντική ενέργεια και η εκπομπή τους χαρακτηρίζεται **ραδιενεργός ακτινοβολία**. **Ραδιενέργεια** ονομάζεται η ιδιότητα της αυθόρμητης και τυχαίας διάσπασης, δηλαδή της διάσπασης χωρίς εξωτερική διέγερση, των ραδιενεργών πυρήνων με ταυτόχρονη εκπομπή ραδιενεργών ακτινοβολιών. Ο όρος ραδιενέργεια (radio activity) αποδόθηκε το 1898 από την Curie για να περιγράψει τη ραδιενεργό συμπεριφορά του ουρανίου και του θορίου που η Curie είχε παρατηρήσει. Η Curie εμπνεύστηκε το μεν πρώτο συνθετικό της λέξης (radio) από το λατινικό radium που σημαίνει ακτίνα, το δε δεύτερο (activity = δραστηριότητα) αποδόθηκε στα ελληνικά ως ενέργεια.

Η ραδιενέργεια ενός υλικού δεν επηρεάζεται από φυσικές και χημικές μεταβολές π.χ. πίεση και θερμοκρασία ή χημική μορφή, αλλά οφείλεται στην αυθόρμητη διάσπαση των πυρήνων των ατόμων. Τα νέα στοιχεία που προκύπτουν από μια τέτοια ραδιενεργό διάσπαση παρουσιάζουν εντελώς διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες των αρχικών στοιχείων.

Οι πιο συνηθισμένες ακτινοβολίες, κατά τη διάσπαση φυσικών ραδιενεργών πυρήνων, είναι:

- **Εκπομπή σωματιδίων α , (ακτινοβολία α).** Το σωματίδιο α συγκροτείται από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια, είναι δηλαδή πυρήνας ηλίου (${}^4_2\text{He}$). Ο ατομικός αριθμός του θυγατρικού πυρήνα είναι μειωμένος κατά 2 σε σχέση με αυτόν του μητρικού (άρα είναι διαφορετικό χημικό στοιχείο από το μητρικό) και ο μαζικός αριθμός του είναι μειωμένος κατά 4.
- **Εκπομπή σωματιδίου β^- , (ακτινοβολία β^-).** Είναι ένα ηλεκτρόνιο που εκπέμπεται από τον πυρήνα κατά τη μετατροπή ενός νετρονίου του πυρήνα σε πρωτόνιο. Ο ατομικός αριθμός του θυγατρικού πυρήνα είναι αυξημένος κατά 1 σε σχέση με αυτόν του μητρικού (άρα είναι διαφορετικό χημικό στοιχείο από το μητρικό) και ο μαζικός

αριθμός του παραμένει αναλλοίωτος. Η εκπομπή β^- συνοδεύεται από εκπομπή ενός αντινετρίνιου.

- **Αντινετρίνιο**, ($\bar{\nu}$). Είναι σωματίδιο μηδενικού ηλεκτρικού φορτίου και αμελητέας μάζας σε σχέση με το ηλεκτρόνιο. Το διάνυσμα του spin του αντινετρίνιου είναι αντιπαράλληλο του διανύσματος της ορμής του.
- **Εκπομπή ποζιτρονίου β^+** . Το ποζιτρόνιο έχει μάζα ίση με αυτήν του ηλεκτρονίου και ηλεκτρικό φορτίο e^+ , όπου e^- το φορτίο του ηλεκτρονίου. Εκπέμπεται κατά τη μετατροπή ενός πρωτονίου του πυρήνα σε νετρόνιο, με ταυτόχρονη εκπομπή ενός νετρίνιου. Ο ατομικός αριθμός του θυγατρικού πυρήνα είναι μειωμένος κατά 1 σε σχέση με αυτόν του μητρικού (άρα είναι διαφορετικό χημικό στοιχείο από το μητρικό) και ο μαζικός αριθμός του παραμένει αναλλοίωτος. Η εκπομπή β^+ συνοδεύεται από εκπομπή ενός νετρίνιου.
- **Νετρίνιο (ν)**. Έχει τις ίδιες ιδιότητες με το αντινετρίνιο, αλλά το διάνυσμα του spin είναι παράλληλο του διανύσματος της ορμής του.
- **Εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, (Ακτινοβολία γ)**. Είναι μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται κατά τη μετάβαση ενός πυρήνα από κάποια ενεργειακή στάθμη διέγερση σε κάποια άλλη χαμηλότερη, εκπέμπεται ένα φωτόνιο ενέργειας ίσης με τη διαφορά των δύο σταθμών ($\approx 0.1-10\text{MeV}$).

Παρατήρηση: Οι ακτινοβολίες άλφα, βήτα και γάμμα ονομάστηκαν αυθαίρετα από τα τρία πρώτα γράμματα του ελληνικού αλφαβήτου.

Σήμερα είναι γνωστό ότι από τα 2,500 γνωστά νουκλίδια, το 90% είναι ραδιενεργά. Τα **ραδιενεργά στοιχεία** χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Τα **φυσικά ραδιενεργά** απαντούν στη φύση και τέτοια είναι τα ισότοπα του ουρανίου (U-238, U-235), του θορίου (Th-232) και τα ραδιενεργά ισότοπα των στοιχείων: κάλιο (K-40), ρουβίδιο (Rb-87), σαμάριο (Sm-147, Sm-148, Sm-149) κ.ά.
- Τα **τεχνητά ραδιενεργά** παράγονται είναι κατασκευάσματα του ανθρώπου και παράγονται κατά το βομβαρδισμό των στοιχείων με σωματίδια, όπως τα πρωτόνια, τα σωματίδια άλφα, τα νετρόνια, κ.λπ. και τέτοια είναι τα ραδιενεργά ισότοπα των στοιχείων: νάτριο (Na-22, Na-24), φωσφόρος (P-32), στρόντιο (Sr-90), κοβάλτιο (Co-60), τεχνητίο (Tc-99), καίσιο (Cs-137), κ.ά.

Εκτός από τον πυρήνα του υδρογόνου H-1 όλοι οι πυρήνες έχουν $N \geq Z$. Εξαιρώντας και πάλι το H-1, μόνο τα ισότοπα με $Z < N \leq 1.6Z$ είναι ευσταθή και από αυτά όχι όλα. Όλοι οι άλλοι πυρήνες (N, Z) είναι ασταθείς.

Η ραδιενεργός διάσπαση είναι φαινόμενο στατιστικό (στοχαστικό), όπως εξάλλου όλα τα ατομικά και πυρηνικά φαινόμενα. Δηλαδή, δεν μπορούμε να γνωρίζουμε πότε θα διασπαστεί ένας πυρήνας, αλλά μπορούμε να προσδιορίσουμε τη πιθανότητα να διάσπαστεί. Κάθε ασταθής ραδιενεργός πυρήνας ισότοπου στοιχείου έχει μια πιθανότητα λ -χαρακτηριστική του πυρήνα- να υποστεί (να λάβει χώρα) διάσπαση στη μονάδα του χρόνου. Το μέτρο της πιθανότητας αυτής καλείται **σταθερά διάσπασης**, λ . Συνεπώς η πιθανότητα να διασπαστεί ο ανωτέρω πυρήνας σε χρονικό διάστημα dt , θα είναι λdt . Στην περίπτωση που υπάρχουν N όμοιοι πυρήνες, το πλήθος των διασπώμενων πυρήνων από τους N (μητρικούς) στο χρόνο dt , θα είναι:

$$dN(t) = -\lambda N(t)dt \quad \Rightarrow \quad \frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t) \quad [20]$$

εκφρασμένη σε Ci ή Bq δίνει το συνολικό ρυθμό διασπάσεων, δεν περιέχει όμως καμιά πληροφορία σχετικά με το είδος ακτινοβολιών που εκπέμπονται ή τις πιθανές βιολογικές ή άλλες επιπτώσεις.

Τα όργανα που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της ραδιενέργειας των υλικών προσδιορίζουν συνήθως το R. Συνεπώς εξ' αυτού, δηλαδή της σχέσης [23], μπορεί να υπολογιστεί η συγκέντρωση C των ραδιενεργών πυρήνων ενός στοιχείου στο δείγμα, N, ως:

$$C = N(t) = \frac{R}{\lambda} \quad [25]$$

Εύκολα συνεπάγεται από τη σχέση [21], ότι αν $N_t = N_0/2$, δηλαδή αν ο αριθμός των πυρήνων που απόμειναν αδιάσπαστοι μείνει ο μισός, αυτό θα έχει συντελεστεί σε χρόνο $t=T$, που θα υπολογίζεται από την σχέση:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \times e^{-\lambda T} \Rightarrow e^{-\lambda T} = \frac{1}{2} \Rightarrow T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad [26]$$

Ο χρόνος T ή $t_{1/2}$, όπως αλλιώς συμβολίζεται, καλείται **χρόνος ημίσειας ζωής** ή **χρόνος υποδιπλασιασμού** και είναι χαρακτηριστική σταθερά των ραδιενεργών στοιχείων.

Επειδή το φαινόμενο της ραδιενεργού διάσπασης είναι όπως είπαμε στατιστικό, δεν μπορούμε να προβλέψουμε πότε θα διασπαστεί ένας πυρήνας, δηλαδή δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί εάν θα διασπαστεί εντός μηδενικού χρόνου ή θα ζήσει άπειρο χρόνο, μπορούμε όμως να υπολογίσουμε τη **μέση ζωή (μέσος χρόνος ζωής) τ** των πυρήνων ορισμένου είδους. Από τον ορισμό της μέσης τιμής:

$$\tau = \int_0^{\infty} t p(t) dt \quad [27]$$

Η πιθανότητα $p(t)dt$ να επιβιώσει ο πυρήνας επί χρόνο t και να διασπαστεί στο διάστημα από t σε t+dt είναι:

$$p(t)dt = \lambda \times e^{-\lambda t} dt \quad [28]$$

Οπότε, από τις σχέσεις [27] και [28], προκύπτει:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad [29]$$

Επίσης, από τις σχέσεις [26] και [29], προκύπτει:

$$T = 0.693\tau \quad [30]$$

1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΑΠΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΕΝΟ ΟΥΡΑΝΙΟ

1.1. ΟΥΡΑΝΙΟ

Το ουράνιο (χημικό σύμβολο U) είναι ένα φυσικό ραδιενεργό στοιχείο το οποίο στην καθαρή του μορφή έχει αργυρό χρώμα και είναι ένα βαρύ μέταλλο, όπως είναι ο μόλυβδος, το κάδμιο και το βολφράμιο. Το ουράνιο έχει μεγάλο ειδικό βάρος, περίπου 19 g/cm^3 , δηλαδή είναι 70% πιο βαρύ από το μόλυβδο, και είναι τόσο βαρύ ώστε ένας κύβος με πλευρά 10 cm ζυγίζει περίπου 20 kg.

Το ουράνιο κατατάσσεται στα υλικά με χαμηλή ειδική ραδιενέργεια. Στη φυσική του μορφή, αποτελείται από τρία ισότοπα, U-234, U-235 και U-238. Άλλα ισότοπα του ουρανίου, τα οποία δεν υπάρχουν στο φυσικό ουράνιο, είναι τα U-232, U-233, U-236 και U-237. Ο πιο κάτω πίνακας δείχνει την περιεκτικότητα κατά βάρος (w/w) του φυσικού ουρανίου στα τρία ραδιοϊσότοπα, το χρόνο ημιζωής τους και την ειδική ραδιενέργεια τους. Ο χρόνος ημιζωής ενός ραδιοϊσοτόπου είναι ο χρόνος που χρειάζεται ώστε η αρχική ραδιενέργεια του να ελαττωθεί στο ήμισυ.

Ισότοπο	%Περιεκτικότητα κατά βάρος w/w	Χρόνος ημιζωής, χρόνια	Ειδική ραδιενέργεια Bq/mg
U-238	99,28	4 510 000 000	12,4
U-235	0,72	710 000 000	80
U-234	0,0057	247 000	231 000

Πίνακας 3: Ραδιοϊσότοπα στο φυσικό ουράνιο

Η εκπομπή ραδιενέργειας η οποία οφείλεται αποκλειστικά στη ραδιενεργό διάσπαση των ισωτόπων του ουρανίου που περιέχει το φυσικό ουράνιο (U-234, U-235 και U-238) είναι $25,4 \text{ Bq/mg}$.

Στη φύση, τα ισότοπα του ουρανίου βρίσκονται τυπικά σε ισορροπία με τα προϊόντα της ραδιενεργού διάσπασης τους (δηλαδή η ραδιενέργεια των προϊόντων της ραδιενεργού διάσπασης είναι περίπου ίση με τη ραδιενέργεια του μητρικού ραδιοϊσοτόπου του ουρανίου). Τα προϊόντα διάσπασης του U-238 περιλαμβάνουν Θόριο-234 (Th-234), Πρωτακτίριο-234 (Pa-234), U-234, Th-230, Ράδιο-226 (Ra-226), Ραδόνιο-222 (Rn-222), Πολώνιο-218 (Po-218), Μόλυβδος -214 (Pb-214), Βισμούθιο 214 (Bi-214), Po-214, Pb-210 και Po-210.

Τα προϊόντα διάσπασης του U-235 περιλαμβάνουν Th-231, Pa-231, Ακτίριο-227 (Ac-227), Th-227, Ra-223, Rn-219, Po-215, Pb-211, Bi-211 και Θάλλιο-207 (Tl-207).

Τα ισότοπα του φυσικού ουρανίου διασπώνται με ταυτόχρονη εκπομπή κυρίως σωματιδίων- α . Η εκπομπή β και γ -ακτινοβολίας είναι πολύ χαμηλή. Ο πιο κάτω πίνακας δείχνει τον μέσο όρο της ενέργειας που εκπέμπεται ανά μετασχηματισμό από τα U-238, U-235 και U-234.

Ισότοπο	Μέσος όρος της ενέργειας που εκπέμπεται ανά μετασχηματισμό, MeV/Bq		
	Σωματίδια-α	Σωματίδια-β	Σωματίδια-γ
U-238	4,26	0,01	0,001
U-235	4,47	0,048	0,154
U-234	4,84	0,0013	0,002

Πίνακας 4: Είδος και επίπεδο ακτινοβολίας (ενέργειας) από το φυσικό ουράνιο

1.2. ΕΠΙΠΕΔΑ ΤΟΥ ΟΥΡΑΝΙΟ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Το ουράνιο απαντάται σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις (ίχνη) στα πετρώματα και το έδαφος, στο νερό και τον αέρα και σε όλα τα υλικά που αποτελούνται από φυσικά στοιχεία. Η συγκέντρωση του ουρανίου στους γρανίτες κυμαίνεται από 2-20 ppmw (μέρη στο εκατομμύριο κατά βάρος). Ουράνιο σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις (50–1000 mg/kg εδάφους) μπορεί να απαντάται σε εδάφη με αποθέματα φωσφοριτών.

Στην ατμόσφαιρα το ουράνιο μπορεί να υπάρχει στα αιωρούμενα σωματίδια (σκόνη). Τα πολύ μικρά αιωρούμενα σωματίδια ουρανίου στον αέρα μπορούν να κατακάθονται στο επιφανειακό νερό, στα φυτά και στο έδαφος. Τα σωματίδια αυτά καταλήγουν στη συνέχεια στο έδαφος ή στο βυθό των λιμνών, ποταμών και δεξαμενών, όπου αναμιγνύονται με το φυσικό ουράνιο που ήδη υπάρχει εκεί. Οι τυπικές συγκεντρώσεις ουρανίου στον αέρα (ατμόσφαιρα) είναι περίπου 2 μBq/m³ (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2000 report).

Το ουράνιο που ανιχνεύεται στο νερό προέρχεται από ουράνιο που διαλύεται από τα πετρώματα και το έδαφος. Τυπικές συγκεντρώσεις U-238 και U-234 σε πόσιμο νερό κυμαίνονται από μερικά δέκατα του mBq/l μέχρι μερικές εκατοντάδες mBq/l, παρόλο που υπάρχουν περιπτώσεις που μετρήθηκαν ψηλότερες συγκεντρώσεις μέχρι 150 Bq/l στη Φινλανδία (UNSCEAR 2000). Οι συγκεντρώσεις του U-235 είναι γενικά πάνω από 20 φορές χαμηλότερες.

Το ουράνιο συγκεντρώνεται στα φυτά από το έδαφος μέσω του ριζικού συστήματος. Οι τυπικές συγκεντρώσεις ισοτόπων του ουρανίου στα λαχανικά είναι ελαφρά ψηλότερες από εκείνες στο πόσιμο νερό. Οι συγκεντρώσεις U-238 που μετρήθηκαν σε σπόρους και φυλλώδη λαχανικά κυμαίνονται μεταξύ 1-400 mBq/kg και 6-2200 mBq/kg αντίστοιχα, ενώ οι συγκεντρώσεις U-235 είναι 20 φορές χαμηλότερες. Οι συγκεντρώσεις σε ριζώδη λαχανικά είναι γενικά χαμηλότερες.

Το ουράνιο είναι ένα πολύ δραστικό μέταλλο και για το λόγο αυτό δεν απαντάται σε καθαρή μορφή στο περιβάλλον. Πρόσθετα με το φυσικό ουράνιο που υπάρχει στα ορυκτά, το μεταλλικό ουράνιο και οι ενώσεις του που παράγονται βιομηχανικά μπορούν να απελευθερώνονται και να επιστρέφουν στο περιβάλλον.

Το ουράνιο μπορεί να αντιδρά με άλλα στοιχεία στο περιβάλλον για τη δημιουργία ενώσεων του ουρανίου, η διαλυτότητα των οποίων είναι κυμαινόμενη. Το ουράνιο συναντάται στο περιβάλλον με τη μορφή του Οξειδίου του Ουρανίου, τυπικά ως UO₂, που είναι μια αδιάλυτη ένωση στα ορυκτά και πολλές φορές ως UO₃, μια μέτρια διαλυτή ένωση που συναντάται στα επιφανειακά νερά. Οι διαλυτές ενώσεις του ουρανίου μπορούν να αντιδρούν με άλλα χημικά στοιχεία και ενώσεις στο περιβάλλον για το σχηματισμό άλλων ενώσεων του ουρανίου. Η χημική μορφή των ενώσεων του ουρανίου καθορίζει το πόσο

εύκολα οι ενώσεις αυτές μπορούν να μεταφέρονται στο περιβάλλον και το πόσο τοξικές μπορεί να είναι. Κάποιες μορφές οξειδίων του ουρανίου είναι πολύ αδρανείς και μπορεί να παραμένουν στο έδαφος για χιλιάδες χρόνια χωρίς να μετακινούνται προς τα κάτω στο νερό του υπεδάφους.

Η μέση συγκέντρωση φυσικού ουρανίου στο έδαφος είναι 2 ppmw, που ισοδυναμεί με 2 g ουρανίου ανά 1000 kg εδάφους. Αυτό σημαίνει ότι το επιφανειακό έδαφος μέχρι βάθος 1 m σε ένα τυπικό κήπο διαστάσεων 10×40 m μπορεί να περιέχει 2 kg ουρανίου, που αντιστοιχεί σε 50 000 000 Bq ραδιενέργειας από τη διάσπαση των ισοτόπων του ουρανίου, αμελώντας τις διαδοχικές διασπάσεις των ισοτόπων της σειράς.

Το ουράνιο που μεταφέρεται στα ζώα μέσω της διατροφής τους με χόρτα και από το έδαφος απομακρύνεται γρήγορα με τα ούρα και τα κόπρανα. Οι συγκεντρώσεις U238 που μετρήθηκαν στο γάλα και το κρέας σε διάφορες περιοχές του κόσμου, κυμαίνονται μεταξύ 0,1–17 mBq/kg και 1-20 mBq/kg αντίστοιχα, ενώ οι συγκεντρώσεις U-235 ήταν 20 φορές χαμηλότερες (UNSCEAR 2000).

1.3. ΑΠΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΕΝΟ ΟΥΡΑΝΙΟ (DEPLETED URANIUM,DU)

Με σκοπό την παραγωγή πυρηνικού καυσίμου για συγκεκριμένους τύπους αντιδραστήρων και πυρηνικών όπλων, το φυσικό ουράνιο πρέπει να εμπλουτιστεί στο ισότοπο U-235, το οποίο χρησιμοποιείται για την πυρηνική σχάση. Κατά τη διεργασία του εμπλουτισμού η συγκέντρωση του U-235 αυξάνεται από τη συγκέντρωση του στο φυσικό ουράνιο (0,72% κατά βάρος) σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις 2-94% κατά βάρος. Στο παραπροϊόν της διεργασίας εμπλουτισμού (μετά την απομάκρυνση του εμπλουτισμένου ουρανίου) παραμένουν μικρές συγκεντρώσεις U-235 και U-234. Αυτό το παραπροϊόν της διεργασίας εμπλουτισμού είναι γνωστό ως 'απεμπλουτισμένο ουράνιο' και περιέχει κυρίως U238. Το απεμπλουτισμένο ουράνιο ορίζεται επίσημα από την Αρμόδια Αρχή Πυρηνικής Ασφάλειας των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (NRC) ως ουράνιο στο οποίο η συγκέντρωση του U-235 είναι μικρότερη από 0,711% κατά βάρος. Οι τυπικές κατά βάρος συγκεντρώσεις των ισοτόπων ουρανίου στο απεμπλουτισμένο ουράνιο είναι: U-238 : 99,8%, U-235 : 0,2% και U-234 : 0,001%.

Στον πίνακα πιο κάτω δίδονται οι συγκεντρώσεις και η % εκπεμπόμενη ραδιενέργεια για το φυσικό και το απεμπλουτισμένο ουράνιο.

Ισότοπο	Φυσικό ουράνιο		Απεμπλουτισμένο ουράνιο	
	%Συγκέντρωση, w/w	%Εκπεμπόμενη Ραδιενέργεια	%Συγκέντρωση, w/w	%Εκπεμπόμενη Ραδιενέργεια
U-238	99,28	48,8	99,8	83,7
U-235	0,72	2,4	0,2	1,1
U-234	0,0057	48,8	0,001	15,2

Πίνακας 5: Σύγκριση φυσικού και απεμπλουτισμένου ουρανίου

1.4. ΑΠΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΕΝΟ ΟΥΡΑΝΙΟ VS ΦΥΣΙΚΟ ΟΥΡΑΝΙΟ (ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ)

Το απεμπλουτισμένο ουράνιο είναι σημαντικά λιγότερο ραδιενεργό από το φυσικό ουράνιο όχι μόνο γιατί περιέχει λιγότερο U-235 και U-234 ανά μονάδα μάζας απ' ό,τι περιέχει το φυσικό ουράνιο, αλλά και γιατί όλα τα προϊόντα διάσπασης πέρα από το U-234 και Th-231 απομακρύνονται κατά την εκχύλιση και τη χημική επεξεργασία του ουρανίου πριν τον εμπλουτισμό του. Η ειδική ραδιενέργεια του ουρανίου στο απεμπλουτισμένο ουράνιο είναι 14,8 Bq/mg σε σύγκριση με 25,4 Bq/mg στο φυσικό ουράνιο. Χρειάζεται μεγάλο χρονικό διάστημα μέχρι που τα προϊόντα διάσπασης του ουρανίου να φθάσουν σε ραδιενεργό ισορροπία με τα φυσικά ισότοπα (π.χ. χρειάζεται 1 εκατομμύριο χρόνια ώστε το Th-230 να φθάσει σε ισορροπία με το U234).

1.5. ΈΚΘΕΣΗ ΑΝΘΡΩΠΟΥ ΣΕ ΦΥΣΙΚΟ ΟΥΡΑΝΙΟ

Κάθε άνθρωπος καταπίνει ή εισπνέει κάθε μέρα μικρές ποσότητες φυσικού ουρανίου. Υπολογίζεται (UNSCEAR 2000) ότι ο μέσος άνθρωπος καταπίνει 1,3 μg (0,033 Bq) ουρανίου την ημέρα, που αντιστοιχεί σε ετήσια κατάποση 11,6 Bq/yr. Έχει επίσης υπολογιστεί ότι ο μέσος άνθρωπος εισπνέει 0,6 μg/yr (15 μB/yr). Τυπικά ο μέσος άνθρωπος λαμβάνει δόση 120 μSv/yr από την κατάποση και εισπνοή προϊόντων διάσπασης του ουρανίου, όπως Ra-226, και τα προϊόντα της διάσπασης του στο νερό, Rn-222 στις κατοικίες και Po-210 στον καπνό των τσιγάρων.

Λόγω των διαφορών στη διατροφή, υπάρχει μεγάλη διακύμανση των επιπέδων ουρανίου που καταπίνει ο πληθυσμός διεθνώς. Το ουράνιο εισέρχεται στον ανθρώπινο οργανισμό κυρίως από το πόσιμο νερό. Σε ορισμένα μέρη οι συγκεντρώσεις ουρανίου στο πόσιμο νερό είναι πολύ ψηλές και αυτό έχει ως συνέπεια η πρόσληψη ουρανίου από τον άνθρωπο να οφείλεται κυρίως στο πόσιμο νερό παρά στα τρόφιμα, π.χ. σε ορισμένα μέρη της Φιλανδίας η πρόσληψη ουρανίου φθάνει τα μερικά δέκατα mg/day.

1.6. ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΑΠΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΕΝΟΥ ΟΥΡΑΝΙΟΥ

Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες του ουρανίου το καθιστούν πολύ ελκυστικό για στρατιωτική χρήση. Το απεμπλουτισμένο ουράνιο χρησιμοποιείται στην κατασκευή βλημάτων για διάτρηση στρατιωτικών θωρακίσεων, όπως αυτές που έχουν τα άρματα, στην κατασκευή της διατρητικής κεφαλής (κόνου) σε πυραύλους και στην κατασκευή θωράκισης των αρμάτων και άλλων στρατιωτικών οχημάτων. Η θωράκιση από απεμπλουτισμένο ουράνιο είναι πολύ πιο δύσκολο να διατρηθεί από συμβατικά αντιαρματικά βλήματα σε σύγκριση με τα συνήθη σκληρά φύλλα χάλυβα.

Τα διατρητικά βλήματα είναι γενικά γνωστά ως «διατρητικά κινητικής ενέργειας». Το απεμπλουτισμένο ουράνιο προτιμάται σε σχέση με άλλα μέταλλα, επειδή έχει μεγάλη πυκνότητα, έχει πυροφορικές ιδιότητες (αυτοαναφλέγεται σε θερμοκρασίες 600–700 °C και ψηλές πιέσεις) και γίνεται περισσότερο αιχμηρό με αδιαβατική θλίψη όταν διεισδύει στο κέλυφος του άρματος. Κατά την πρόσκρουση στο στόχο οι διατρητικές κεφαλές από απεμπλουτισμένο ουράνιο αναφλέγονται, θρυμματίζονται σε μικρά κομμάτια (θραύσματα) και δημιουργούν σύννεφα αιωρούμενης σκόνης (αεροζόλς) απεμπλουτισμένου ουρανίου το μέγεθος των οποίων εξαρτάται από τη γωνία πρόσκρουσης, την ταχύτητα του βλήματος και

τη θερμοκρασία. Αυτά τα πολύ μικρά σωματίδια μπορεί να αυτοαναφλεγούν στον αέρα. Μικρά κομμάτια απεμπλουτισμένου ουρανίου μπορεί να αναφλεγούν αν βρεθούν μέσα σε φωτιά και να καούν, όμως από διάφορες δοκιμές διαπιστώθηκε ότι μεγαλύτερα κομμάτια, όπως οι διατρητικές κεφαλές των αντιαρματικών βλημάτων, ή τα αντισταθμιστικά βάρη στα αεροπλάνα, συνήθως δεν αναφλέγονται αν βρεθούν μέσα σε φωτιά.

1.7. ΠΡΟΣΜΙΞΕΙΣ ΣΤΟ ΑΠΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΕΝΟ ΟΥΡΑΝΙΟ

Οι πιο μεγάλες ποσότητες απεμπλουτισμένου ουρανίου που χρησιμοποιήθηκαν στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής προέρχονται από τις διεργασίες εμπλουτισμού του ουρανίου και προμηθευτής τους ήταν το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ.

Μεταξύ των ετών 1950-1970, το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ πρόβη σε εμπλουτισμό επανεπεξεργασμένου ουρανίου από αναλωθέντα καύσιμα πυρηνικών αντιδραστήρων για την ανάκτηση του U-235 που δεν είχε διασπαστεί. Σε αντίθεση με το φυσικό ουράνιο, το επανεπεξεργασμένο ουράνιο περιέχει ανθρωπογενή (τεχνητά) ραδιοϊσότοπα, περιλαμβανομένων του ισότοπου του ουρανίου U-236, μικρών συγκεντρώσεων υπερουρανίων στοιχείων (στοιχεία βαρύτερα από το ουράνιο, όπως ποσειδώνιο (Np), πλουτόνιο (Pu) και αμερίκιο (Am)) και προϊόντων της σχάσης, όπως τεχνήτιο (Tc-99).

Ως αποτέλεσμα, το παραπροϊόν (απεμπλουτισμένο ουράνιο) από τη διεργασία εμπλουτισμού του επανεπεξεργασμένου ουρανίου περιέχει επίσης αυτά τα ανθρωπογενή ραδιοϊσότοπα, σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις (ίχνη). Κατά τον εμπλουτισμό του επανεπεξεργασμένου ουρανίου οι εσωτερικές επιφάνειες του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται καλύπτονται με τα ανθρωπογενή αυτά ραδιοϊσότοπα και επειδή ο ίδιος εξοπλισμός χρησιμοποιήθηκε για τον εμπλουτισμό του φυσικού ουρανίου, τα ανθρωπογενή αυτά ραδιοϊσότοπα μίαναν και το απεμπλουτισμένο ουράνιο που παρήχθη από τον εμπλουτισμό του φυσικού ουρανίου.

Οι ακριβείς ποσότητες δεν είναι γνωστές. Η ραδιοχημική ανάλυση δειγμάτων απεμπλουτισμένου ουρανίου δείχνει ότι οι μικρές αυτές προσμίξεις είναι της τάξης του μέρους στο δισεκατομμύριο (ppbw) και έχουν ως συνέπεια την αύξηση κατά τι λιγότερο από 1% της δόσης από απεμπλουτισμένο ουράνιο. Η Αρμόδια Αρχή Πυρηνικής Ασφάλειας των ΗΠΑ γνώριζε για τις προσμίξεις αυτές στο απεμπλουτισμένο ουράνιο και από τις μελέτες που έκανε κατέληξε στο συμπέρασμα ότι δεν δημιουργούσαν οποιουδήποτε πρόσθετους κινδύνους και ήταν ασφαλείς.

Η παρουσία U-236 και Pu-239/240 στο απεμπλουτισμένο ουράνιο έχει επιβεβαιωθεί από αναλύσεις βλημάτων που συλλέχθηκαν κατά την αποστολή της UNEP στο Κόσσοβο το Νοέμβριο του 2000. Η ραδιενέργεια του U-236 στα βλήματα αυτά ήταν της τάξης των 60 000 Bq/kg, ενώ η ραδιενέργεια του πλουτωνίου κυμαινόταν από 0,8–12,87 Bq/kg.

1.8. ΜΕΛΕΤΕΣ ΣΕ ΑΝΘΡΩΠΟΥΣ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΕΚΤΕΘΕΙ ΣΕ ΟΥΡΑΝΙΟ Η ΑΠΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΕΝΟ ΟΥΡΑΝΙΟ

Από την αρχή της πυρηνικής εποχής, έχει γίνει εκτεταμένη χρήση ουρανίου, αρχίζοντας από την εξόρυξη του, τον εμπλουτισμό και την κατασκευή πυρηνικών καυσίμων. Στις πιο πάνω δραστηριότητες εργάστηκε μεγάλος αριθμός ατόμων, και έχουν γίνει πολλές μελέτες για την επαγγελματική υγεία όλων αυτών των εργαζομένων.

Ο πρωταρχικός κίνδυνος για τους μεταλλωρύχους, όχι μόνο γι' αυτούς που εργάστηκαν στην εξόρυξη του ουρανίου, οφείλεται στην έκθεση στο αέριο ραδόνιο (κυρίως Rn-222) και στα προϊόντα της ραδιενεργού διάσπασης του. Μελέτη που έγινε για μεταλλωρύχους που εργάστηκαν σε ορυχεία με πτωχό εξαερισμό σε περιόδους που δεν ήταν γνωστοί οι κίνδυνοι από έκθεση στο ραδόνιο και ως εκ τούτου εκτέθηκαν σε ψηλές δόσεις ακτινοβολίας, έδειξε ότι η ομάδα αυτή είχε μεγάλα ποσοστά καρκίνου των πνευμόνων και ότι ο κίνδυνος αυξανόταν με την αύξηση της έκθεσης στο ραδόνιο. Έχουν γίνει επίσης μελέτες για έκθεση σε ουράνιο εργαζομένων στον κύκλο των πυρηνικών καυσίμων. Υπάρχουν αναφορές για αυξημένα περιστατικά καρκίνου, όμως σε αντίθεση με τους μεταλλωρύχους, δεν διαπιστώνεται συσχέτιση με την έκθεση σε ραδιενέργεια. Τα κύρια ευρήματα των μελετών αυτών ήταν ότι η υγεία των εργαζομένων αυτών ήταν καλύτερη από την υγεία του μέσου πληθυσμού. Αυτή η διαπίστωση πιστεύεται ότι οφείλεται στη διαδικασία επιλογής για εργοδότηση και των συνολικών ωφελημάτων για εργασία στον τομέα αυτό.

Αναφορικά με την έκθεση σε απεμπλουτισμένο ουράνιο, έχουν γίνει μελέτες για την υγεία στρατιωτικού προσωπικού που πήρε μέρος στον πόλεμο του Κόλπου (1990 – 1991) και κατά τη διάρκεια των πολεμικών επιχειρήσεων στα Βαλκάνια (1994 – 1999). Μικρός αριθμός βετεράνων του πολέμου στον Κόλπο έχει θραύσματα απεμπλουτισμένου ουρανίου στο σώμα, τα οποία δεν μπορούν να χειρουργηθούν και αποτέλεσαν αντικείμενο εκτεταμένης μελέτης τα αποτελέσματα της οποίας έχουν δημοσιευτεί.

Οι βετεράνοι αυτοί είχαν ψηλά επίπεδα απεμπλουτισμένου ουρανίου στα ούρα, αλλά μέχρι στιγμής δεν έχουν παρατηρηθεί συμπτώματα στην υγεία τους λόγω του απεμπλουτισμένου ουρανίου. Έχουν γίνει επίσης επιδημιολογικές μελέτες για την υγεία στρατιωτικού προσωπικού που ενεπλάκη σε συρράξεις όπου χρησιμοποιήθηκε απεμπλουτισμένο ουράνιο, σε σύγκριση με την υγεία προσωπικού που δεν ήταν στις πολεμικές ζώνες. Τα αποτελέσματα των μελετών αυτών έχουν δημοσιευτεί και το κύριο συμπέρασμα είναι ότι οι βετεράνοι του πολέμου στον Κόλπο δείχνουν μικρή (στατιστικά ασήμαντη) αύξηση στο ρυθμό θνησιμότητας, όμως αυτή η αύξηση οφείλεται μάλλον σε ατυχήματα παρά σε ασθένειες και δεν μπορεί να αποδοθεί σε έκθεση στο απεμπλουτισμένο ουράνιο.

1.9. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΟΥΡΑΝΙΟ ΣΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΣΩΜΑ

Το ουράνιο εισέρχεται στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω του πεπτικού συστήματος με τις τροφές και το νερό και μέσω του αναπνευστικού συστήματος με την εισπνοή του αέρα. Κατά την εισπνοή, το ουράνιο είναι προσκολλημένο σε σωματίδια διαφόρων μεγεθών. Το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων (αεροζόλς) ουρανίου και η διαλυτότητα των ενώσεων του ουρανίου στους πνεύμονες και στο στομάχι καθορίζουν τη μεταφορά του ουρανίου στα διάφορα όργανα του σώματος.

Τα μεγάλα σωματίδια κατακρατούνται στο ανώτερο μέρος του αναπνευστικού συστήματος (μύτη, τραχεία) από όπου εμπνέονται ή καταπίνονται μέσω του φάρυγγα. Τα πολύ λεπτόκοκκα σωματίδια εισέρχονται στο κατώτερο μέρος του αναπνευστικού συστήματος, στους πνεύμονες (βρόγχοι, κυψελίδες). Αν οι ενώσεις του ουρανίου δεν είναι εύκολα διαλυτές, τα σωματίδια ουρανίου τείνουν να παραμένουν στους πνεύμονες για μεγάλα χρονικά διαστήματα (μέχρι και 16 χρόνια), εκθέτοντας τους πνεύμονες σε ακτινοβολία. Σταδιακά διαλύονται και μεταφέρονται στο αίμα. Οι πιο διαλυτές ενώσεις του ουρανίου απορροφώνται και μεταφέρονται πιο γρήγορα από τους πνεύμονες στο αίμα. Περίπου 10% του αρχικού ουρανίου συγκεντρώνεται στους νεφρούς.

Το μεγαλύτερο ποσοστό του ουρανίου που εισέρχεται στο σώμα μέσω της πεπτικής οδού απομακρύνεται με τα κόπρανα μέσα σε μερικές ημέρες και δεν φθάνει στο αίμα. Το υπόλοιπο ποσοστό μεταφέρεται στο αίμα. Το περισσότερο ουράνιο στο αίμα απομακρύνεται με τα ούρα μέσα σε μερικές ημέρες, όμως μικρό ποσοστό παραμένει στους νεφρούς, στα οστά και σε άλλους μαλακούς ιστούς.

1.10. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ ΑΠΟ ΟΥΡΑΝΙΟ ΚΑΙ ΑΠΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΕΝΟ ΟΥΡΑΝΙΟ

Το ουράνιο όταν εισπνέεται ή καταπίνεται σε σημαντικές ποσότητες μπορεί να προκαλεί βλάβες στην ανθρώπινη υγεία λόγω της χημικής τοξικότητάς του. Όπως ο υδράργυρος, το κάδμιο και άλλα βαριά μέταλλα, έτσι και το ουράνιο σε υπερβολικές συγκεντρώσεις (ιόντα ουρανίου) μπορεί να επηρεάσουν τη λειτουργία των νεφρών. Ψηλές συγκεντρώσεις ουρανίου στους νεφρούς μπορεί να βλάψουν και σε ακραίες περιπτώσεις να καταστρέψουν πλήρως τη λειτουργία των νεφρών.

Υπάρχει γενικά σύμπτωση απόψεων στην ιατρική και την επιστημονική κοινότητα ότι σε ψηλές συγκεντρώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό το ουράνιο είναι πιθανό να καθίσταται χημικά τοξικό προτού αυτό καταστεί ακτινολογικό πρόβλημα (έκθεση σε ακτινοβολία). Δεδομένου ότι το ουράνιο θεωρείται ελαφρά ραδιενεργό όταν εισέρχεται στον ανθρώπινο οργανισμό ακτινοβολεί τα διάφορα όργανα, όμως η κύρια επίδραση στην ανθρώπινη υγεία συνδέεται με την τοξική χημική επίδραση που έχει στις διάφορες λειτουργίες του σώματος.

Σε πολλές χώρες, το μέγιστο αποδεκτό όριο έκθεσης κατά την εργασία σε διαλυτές ενώσεις του ουρανίου είναι 3μg/g νεφρικού ιστού. Οποιοσδήποτε επιδράσεις λόγω έκθεσης των νεφρών σε μικρότερες συγκεντρώσεις θεωρούνται αμελητέες και πρόσκαιρες. Τα μέτρα που λαμβάνονται σήμερα, με βάση και το πιο πάνω όριο φαίνεται ότι είναι ικανοποιητικά για την προστασία των εργαζομένων στη βιομηχανία ουρανίου. Με βάση την ισχύουσα νομοθεσία και με σκοπό την αποφυγή υπερβάσεων του πιο πάνω ορίου στους νεφρούς, το μακροπρόθεσμο (8h) όριο συγκέντρωσης διαλυτού ουρανίου στον αέρα στους χώρους εργασίας είναι 0,2 mg/m³ και το βραχυπρόθεσμο (15 min) όριο είναι 0,6 mg/m³.

1.11. ΣΥΝΔΕΣΗ ΟΥΡΑΝΙΟ Η ΤΟ ΑΠΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΕΝΟ ΟΥΡΑΝΙΟ ΜΕ ΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΚΑΡΚΙΝΟ

Όπως συμβαίνει με όλα τα ραδιενεργά υλικά, η έκθεση σε ακτινοβολία που εκπέμπεται από φυσικό ή απεμπλουτισμένο ουράνιο εγκυμονεί κινδύνους ανάπτυξης καρκίνου. Η Διεθνής Επιτροπή Ακτινοπροστασίας (ICRP) έχει προτείνει όρια έκθεσης σε ιονίζουσα ακτινοβολία τα οποία έχουν υιοθετηθεί στα πρότυπα ακτινοπροστασίας του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ) (και στις σχετικές Οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης και στην ισχύουσα νομοθεσία της Κύπρου). Η ετήσια ενεργός δόση για το κοινό δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1 mSv, ενώ για τους εργαζομένους η μέση επιτρεπόμενη δόση είναι 20 mSv (100 mSv συνολικά για πέντε συνεχόμενα χρόνια, 50 mSv μέγιστη ενεργός δόση μέσα σε ένα χρόνο). Ο πρόσθετος κίνδυνος (πιθανότητα) ανάπτυξης θανατηφόρου καρκίνου λόγω έκθεσης σε 1 mSv υπολογίζεται σε 1 στις 20000. Η αύξηση αυτή του κινδύνου θεωρείται ασήμαντη συγκρινόμενη με τον κίνδυνο να αναπτύξει

θανατηφόρο καρκίνο όλος ο πληθυσμός που υπολογίζεται σε 1 στους 5. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο καρκίνος μπορεί να εκδηλωθεί αρκετά χρόνια μετά την έκθεση σε ακτινοβολία.

Είναι εφικτό να υπολογιστεί η έκθεση ενός ατόμου σε απεμπλουτισμένο ουράνιο πριν υπάρξει υπέρβαση των πιο πάνω ορίων χημικής και ραδιολογικής έκθεσης. Στον πιο κάτω πίνακα φαίνεται πόσο απεμπλουτισμένο ουράνιο θα πρέπει να εισπνεύσει ή να καταπιεί κάποιος ώστε η συγκέντρωση του στους νεφρούς να υπερβεί τα 3 μg/g νεφρικού ιστού (όριο χημικής τοξικότητας) ή την ενεργό δόση 1 mSv (όριο ετήσιας έκθεσης σε ιονίζουσα ακτινοβολία για το κοινό). Οι τιμές στον πίνακα υπολογίστηκαν με βάση τα βιοκινητικά μοντέλλα που εισηγείται σήμερα η Διεθνής Επιτροπή Ακτινοπροστασίας (ICRP). Οι υπολογισμοί έχουν γίνει για δύο τύπους ενώσεων ουρανίου: (α) ενώσεις μέτρια διαλυτές, όπως UO₃ και U₃O₈ (β) αδιάλυτες ενώσεις, όπως UO₂ (ενώσεις αναφοράς).

1.12. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΟΥΡΑΝΙΟΥ ΣΤΑ ΠΑΙΔΙΑ

Όπως συμβαίνει και με τους ενήλικες, τα παιδιά εκτίθενται σε μικρές ποσότητες ουρανίου στον αέρα, τα τρόφιμα και το πόσιμο νερό. Παρόλα αυτά δεν έχουν αναφερθεί περιπτώσεις στις οποίες η έκθεση σε ουράνιο να είχε επιπτώσεις στην υγεία παιδιών. Δεν είναι γνωστό κατά πόσο τα παιδιά διαφέρουν από τους ενήλικες σε ότι αφορά την ευαισθησία για επιδράσεις στην υγεία μετά από έκθεση σε ουράνιο. Πειραματικά έχει διαπιστωθεί ότι νεαρά πειραματόζωα απορροφούν περισσότερο ουράνιο στο αίμα τους σε σύγκριση με γηραιότερα πειραματόζωα όταν τους δίδεται τροφή ή νερό με ουράνιο.

Δεν είναι γνωστό κατά πόσο το ουράνιο έχει επιδράσεις στην ανάπτυξη του ανθρώπινου εμβρύου. Υπάρχουν ερευνητικές μελέτες για γενετικές επιδράσεις και αυξημένους θανάτους εμβρύων σε ζώα στα οποία δίδονταν με το νερό ψηλές δόσεις ουρανίου. Σε πειράματα με έγκυα πειραματόζωα, μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό (0,03%) του ουρανίου που δόθηκε έφθασε στο έμβρυο. Ακόμη λιγότερο ουράνιο είναι πιθανό να φθάσει στο έμβρυο σε μητέρες που εισπνέουν ή καταπίνουν ουράνιο. Δεν υπάρχουν δεδομένα μετρήσεων ουρανίου στογάλα γαλουχουσών μητέρων. Λόγω των χημικών ιδιοτήτων του είναι πολύ πιθανό το ουράνιο να συγκεντρώνεται στο γάλα της γαλουχούσας μητέρας. Οι επιδράσεις του ουρανίου στο αναπαραγωγικό σύστημα δεν είναι γνωστές. Πολύ ψηλές δόσεις ουρανίου είχαν ως αποτέλεσμα τη μείωση του αριθμού των σπερματοζωαρίων σε μερικές περιπτώσεις πειραμάτων με ζώα στο εργαστήριο, όμως η πλειοψηφία των μελετών δεν έχουν δείξει οποιαδήποτε επίδραση.

1.13. ΠΙΘΑΝΟΙ ΤΡΟΠΟΙ ΕΚΘΕΣΗΣ ΑΠΟ ΒΛΗΜΑΤΑ ΑΠΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΕΝΟΥ ΟΥΡΑΝΙΟΥ

Ο μεγαλύτερος κίνδυνος που συνδέεται με τα βλήματα απεμπλουτισμένου ουρανίου είναι η εισπνοή σκόνης (αεροζόλς) που δημιουργείται όταν το βλήμα απεμπλουτισμένου ουρανίου προσκρούει στο θωρακισμένο στόχο. Το μέγεθος, η κατανομή και η χημική σύσταση των σωματιδίων που απελευθερώνονται με την πρόσκρουση κυμαίνονται κατά περίπτωση, όμως το ποσοστό των μικρών σωματιδίων (αεροζόλς), τα οποία μπορούν να εισέλθουν εύκολα στους πνεύμονες, είναι πιθανό σε ορισμένες περιπτώσεις να φθάσει μέχρι και 96%.

Μια τυπική σύσταση αυτών των σωματιδίων είναι περίπου 60% U₃O₈, 20% UO₂ και περίπου 20% άλλα άμορφα οξείδια. Τόσο το U₃O₈ όσο και το UO₂ είναι αδιάλυτες ενώσεις.

Τα άτομα που είναι πιθανό να εκτίθενται στις μεγαλύτερες δόσεις από βλήματα απεμπλουτισμένου ουρανίου είναι συνεπώς εκείνα που βρίσκονται κοντά στο στόχο κατά την πρόσκρουση (έκρηξη) ή εκείνα που εξετάζουν μετά την έκρηξη το στόχο ή εισέρχονται στο στόχο (άρματα μάχης).

Ένας πιθανός τρόπος έκθεσης ατόμων που επισκέπτονται ή κατοικούν σε περιοχές που έχουν επηρεαστεί από απεμπλουτισμένο ουράνιο μετά την κατακάθιση της σκόνης είναι η εισπνοή σωματιδίων απεμπλουτισμένου ουρανίου από το έδαφος τα οποία αιωρούνται ξανά στην ατμόσφαιρα λόγω του ανέμου ή των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Ο κίνδυνος στην περίπτωση αυτή είναι μικρότερος, επειδή τα επαναιωρημένα σωματίδια ουρανίου συνενώνονται με άλλες ουσίες και αυξάνουν σε μέγεθος με συνέπεια μικρότερο ποσοστό του εισπνεόμενου ουρανίου να φθάνει στα βαθύτερα μέρη των πνευμόνων και τις κυψελίδες. Άλλος πιθανός τρόπος έκθεσης είναι η ακούσια ή σκόπιμη κατάποση χώματος, π.χ. οι γεωργοί που εργάζονται σε περιοχές όπου έχουν εκραγεί βλήματα απεμπλουτισμένου ουρανίου είναι πιθανό να καταπίνουν ακούσια μικρές ποσότητες χώματος, ενώ τα παιδιά πολλές φορές βάζουν σκόπιμα στο στόμα τους χώματα.

Μακροπρόθεσμα, ο πιο σημαντικός τρόπος έκθεσης σε απεμπλουτισμένο ουράνιο είναι η κατάποση (μέσω του πεπτικού συστήματος) του απεμπλουτισμένου ουρανίου που μεταφέρεται στο πόσιμο νερό και στην τροφική αλυσίδα με τη διάχυση στο έδαφος ή την εναπόθεση στα φυτά. Ο κίνδυνος από την κατανάλωση τροφής και πόσιμου νερού είναι γενικά χαμηλός, επειδή το ουράνιο δεν μεταφέρεται εύκολα μέσα στην τροφική αλυσίδα. Έχει επίσης υπολογιστεί ότι ένα μεγάλο ποσοστό από τα βλήματα απεμπλουτισμένου ουρανίου που εκτοξεύουν τα πολεμικά αεροπλάνα δεν βρίσκουν το στόχο. Η πλειοψηφία των βλημάτων αυτών εισέρχεται στο έδαφος, κοντά στο στόχο. Η φυσική κατάσταση των βλημάτων αυτών ποικίλλει και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους και μπορεί να είναι μικρά μεταλλικά τμήματα μέχρι και ανέπαφα βλήματα.

Άτομα που θα βρουν και θα χρησιμοποιήσουν τα βλήματα ή τα θραύσματα αυτά μπορεί να εκτεθούν σε εξωτερική ακτινοβολία που εκπέμπει το απεμπλουτισμένο ουράνιο π.χ. ένας αγρότης που καλλιεργεί το χωράφι του σε κάποιο χρόνο μετά τις εχθροπραξίες μπορεί να βρει θραύσματα ή ανέπαφα βλήματα. Λόγω του είδους της ακτινοβολίας που εκπέμπει το απεμπλουτισμένο ουράνιο, η δόση που θα δεχθεί θα ήταν σημαντική μόνο αν το άτομο αυτό έρθει σε άμεση επαφή και για αρκετό χρόνο με τα βλήματα/θραύσματα απεμπλουτισμένου ουρανίου. Επιπλέον, τα άτομα αυτά με τη χρησιμοποίηση των βλημάτων/θραυσμάτων μπορεί να καταπιούν ακούσια (π.χ. επαφή των χεριών με την τροφή) μέρος των ελεύθερων οξειδίων του ουρανίου που σχηματίζονται λόγω των καιρικών συνθηκών στην επιφάνεια του μετάλλου.

Με την πάροδο του χρόνου, λόγω των συνθηκών τα μεταλλικά βλήματα/θραύσματα απεμπλουτισμένου ουρανίου οξειδώνονται και τα οξείδια διασπείρονται στο έδαφος. Το απεμπλουτισμένο ουράνιο στο έδαφος βρίσκεται σε οξειδωμένη μορφή, είναι διαλυτό χημικά και διαχέεται στα επιφανειακά και υπόγεια νερά, από όπου μπορεί να μπαίνει στην τροφική αλυσίδα, και να καταναλώνεται στη συνέχεια από τον άνθρωπο. Είναι δύσκολο να προβλεφθεί ο χρόνος που χρειάζεται μέχρι να εκτεθεί ο πληθυσμός σε απεμπλουτισμένο ουράνιο με τον τρόπο αυτό, όμως είναι λογικό να γίνει η παραδοχή ότι χρειάζονται μερικά χρόνια προτού ανιχνευθούν σημαντικά επίπεδα απεμπλουτισμένου ουρανίου στο νερό και στα τρόφιμα.

1.14. ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΑΠΟ ΤΟ ΧΕΙΡΙΣΜΟ ΒΛΗΜΑΤΩΝ ΑΠΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΕΝΟΥ ΟΥΡΑΝΙΟΥ

Ο ρυθμός δόσης κατά την επαφή με βλήματα/θραύσματα απεμπλουτισμένου ουρανίου είναι περίπου 2 mSv/h (δηλαδή αν κάποιος κρατά με το χέρι το βλήμα για δύο συνεχείς ώρες η παλάμη του θα δεχθεί δόση ακτινοβολίας 2 mSv), κυρίως λόγω διασπάσεων β-ακτινοβολίας της σειράς του απεμπλουτισμένου ουρανίου. Με αυτό το ρυθμό δόσης είναι απίθανο να προκληθούν εγκαύματα (ερύθημα) ή άλλες άμεσες επιδράσεις από παρατεταμένη επαφή με βλήματα απεμπλουτισμένου ουρανίου. Όμως, η δόση ακτινοβολίας από το χειρισμό και την επαφή με βλήματα/θραύσματα απεμπλουτισμένου ουρανίου που μπορεί να δεχθεί κάποιος είναι τέτοια που απαιτείται να ελαχιστοποιείται ο χρόνος χειρισμού και να χρησιμοποιείται προστατευτικός εξοπλισμός (γάντια) ώστε η δόση αυτή να ελαχιστοποιείται. Γι' αυτό, είναι απαραίτητο να γίνονται εκστρατείες διαφώτισης του πληθυσμού, ώστε το κοινό να αποφεύγει την επαφή με βλήματα/θραύσματα απεμπλουτισμένου ουρανίου. Αυτό πρέπει να είναι μέρος κάθε εκτίμησης του κινδύνου και για την εφαρμογή μέτρων προστασίας πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο σκοπός των μέτρων και ο αριθμός των βλημάτων που χρησιμοποιήθηκαν σε μια περιοχή.

1.15. ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΑΠΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΕΝΟΥ ΟΥΡΑΝΙΟΥ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Οι πιθανές επιδράσεις του απεμπλουτισμένου ουρανίου στο περιβάλλον εξαρτώνται από τις ειδικές συνθήκες όπου έγινε χρήση βλημάτων απεμπλουτισμένου ουρανίου και από τα φυσικά, χημικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος που επηρεάζεται.

Όμως, μπορούν να γίνουν μερικές γενικές παρατηρήσεις. Μελέτες που έχουν γίνει σε επίπεδο δοκιμών έχουν δείξει ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των αεροζόλς που δημιουργούνται κατά την πρόσκρουση του βλήματος σε θωρακισμένο στόχο και την έκρηξη κατακάθονται μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα (μερικά λεπτά) μετά την πρόσκρουση στην κοντινή περιοχή γύρω από το στόχο, παρόλο που μικρότερα σωματίδια μπορεί να μεταφέρονται από τον άνεμο σε μακρύτερες αποστάσεις (μερικές εκατοντάδες μέτρα).

Μετά την κατακάθιση τους στο έδαφος τα σωματίδια απεμπλουτισμένου ουρανίου συνενώνονται με άλλα υλικά και αυξάνουν σε μέγεθος, με αποτέλεσμα ο κίνδυνος εισπνοής τους να γίνεται μικρότερος. Ο κίνδυνος για την εισπνοή συνδέεται με το υλικό που επαναφέρεται (αιωρείται ξανά) στην ατμόσφαιρα από το έδαφος με τη δράση του ανέμου ή δραστηριοτήτων του ανθρώπου, όπως π.χ. η καλλιέργεια του εδάφους.

Με την πάροδο του χρόνου οι συγκεντρώσεις απεμπλουτισμένου ουρανίου στην επιφάνεια του εδάφους μειώνονται λόγω του ανέμου και της βροχής που μεταφέρουν το απεμπλουτισμένο ουράνιο μακρύτερα ή το ξεπλένουν στο έδαφος. Ως εκ τούτου, ο κίνδυνος εισπνοής σκόνης απεμπλουτισμένου ουρανίου που επαναιωρείται στην ατμόσφαιρα μειώνεται με την πάροδο τη χρόνου.

Το απεμπλουτισμένο ουράνιο στο έδαφος μπορεί να μεταφέρεται στα επιφανειακά, στα υπόγεια και στα ρέοντα νερά. Τα φυτά μπορούν επίσης να απορροφήσουν απεμπλουτισμένο ουράνιο από το έδαφος και τα νερά. Ένα μικρό μέρος του απεμπλουτισμένου ουρανίου που ανιχνεύεται στη βλάστηση και στο νερό προέρχεται από την άμεση κατακάθιση στην επιφάνεια του νερού. Η χημική και φυσική σύνθεση του εδάφους καθορίζει την διαλυτότητα και την κινητικότητα των σωματιδίων του απεμπλουτισμένου ουρανίου. Το απεμπλουτισμένο ουράνιο στο νερό και στη βλάστηση μεταφέρεται στα ζώα μέσω της διατροφής με χόρτα και της κατάποσης νερού και χώματος. Μελέτες έχουν δείξει

ότι η βιοσυσσωρευση ουρανίου στα φυτά και τα ζώα είναι πολύ μικρή και έτσι συμπεραίνεται ότι το ουράνιο ουσιαστικά δεν μεταφέρεται στην τροφική αλυσίδα.

Το απεμπλουτισμένο ουράνιο στο έδαφος βρίσκεται σε οξειδωμένη και διαλυτή χημική μορφή και μεταναστεύει στα επιφανειακά και υπόγεια νερά και εισέρχεται στην τροφική αλυσίδα. Είναι δύσκολο να προβλεφθεί πόσος χρόνος χρειάζεται για να συμβεί αυτό. Ως αποτέλεσμα των συνθηκών, τα βλήματα απεμπλουτισμένου ουρανίου στο έδαφος σιγά-σιγά οξειδώνονται και παράγονται οξείδια του ουρανίου. Τα ειδικά χαρακτηριστικά του εδάφους καθορίζουν το ρυθμό και τη χημική μορφή της οξείδωσης καθώς και το ρυθμό μετακίνησης και τη διαλυτότητα του ουρανίου. Οι διεργασίες αυτές μπορούν να οδηγήσουν μακροπρόθεσμα (σε μερικά χρόνια) σε αυξημένα επίπεδα απεμπλουτισμένου ουρανίου στα επιφανειακά και υπόγεια νερά.

Η κατανάλωση νερού και τροφής μπορεί να οδηγήσει μακροπρόθεσμα στην είσοδο απεμπλουτισμένου ουρανίου στον ανθρώπινο οργανισμό. Ως εκ τούτου, η παρακολούθηση των επιπέδων ραδιενέργειας στους υδάτινους πόρους είναι χρήσιμη για την εκτίμηση της πιθανής πρόσληψης ουρανίου μέσω του πεπτικού συστήματος. Σε περιπτώσεις υπέρβασης των αποδεκτών ορίων, μπορεί να γίνεται επεξεργασία με διήθηση/ιονεναλλαγή του νερού για τη μείωση των επιπέδων απεμπλουτισμένου ουρανίου.

1.16. ΚΥΡΙΟ ΑΡΜΑ ΜΑΧΗΣ AMRAMSM1

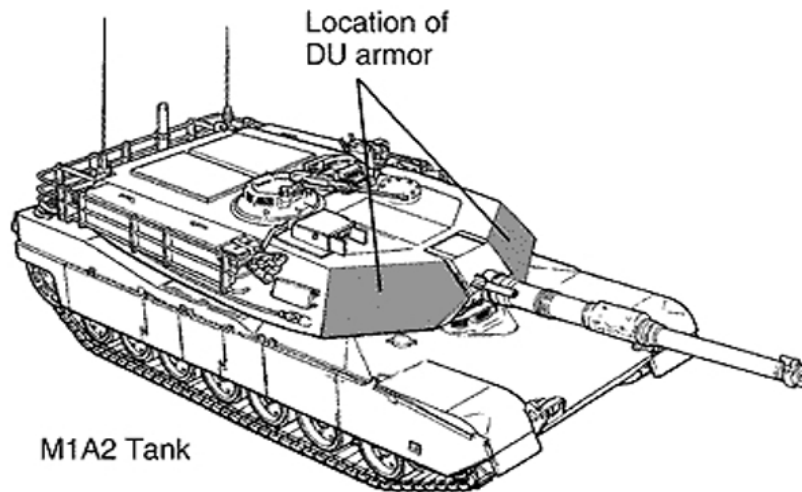
Στο παρόν άρθρο γίνεται μια σύντομη παρουσίαση στο M1 Abrams και συγκεκριμένα στην έκδοση M1A1. Το M1A1 την παρούσα στιγμή είναι το κύριο άρμα μάχης του στρατού των ΗΠΑ όπως και μερικών συμμάχων τους στην Περιοχή της Μ. Ανατολής (Αίγυπτος 880 άρματα μάχης M1A1, Κουβέιτ 218 άρματα Μάχης M1A2, Σαουδική Αραβία 315 άρματα μάχης M1A2). Γύρω στα 8800 άρματα μάχης M1 και M1A1 και 77 M1A2 έχουν κατασκευαστεί για τον αμερικανικό στρατό. Από αυτά 600 M1A1 έχουν αναβαθμιστεί στην πιο σύγχρονη έκδοση M1A2 την περίοδο 1996-2001. Επιπλέον, το 2004 ο αυστραλιανός στρατός αγόρασε 59 M1A1, ενώ το 2005 η Αίγυπτος προμηθεύτηκε άλλα 125. Επιπλέον άλλα 58 M1A1 τα οποία αναβαθμίστηκαν στην έκδοση M1A2 παραδόθηκαν στην Σαουδική Αραβία την περίοδο 2006.

Το αρχικό M1 Abrams εισήλθε σε υπηρεσία τέλη της δεκαετίας 70 και ήταν αρχικά εφοδιασμένο με ένα ραβδωτό πυροβόλο 105 mm. Το M1A1 εισήλθε σε παραγωγή την περίοδο 1985 -1993. Συνολικά παρήχθησαν 4796 M1A1 για τον αμερικανικό στρατό. Από την έκδοση αυτή και έπειτα αντικαταστάθηκε το ραβδωτό πυροβόλο των 105 mm M68A1 από ένα λειόκανο 120mm M256 σχεδίασης Rheimentall κατασκευής Chrysler Defense. Το 120mm M256 Rheimentall κατασκευάστηκε κατόπιν άδειας για το M1A1, είναι πανομοιότυπο με το L/44 που είναι εξοπλισμένα τα Leopard 2 (τα Leo 2 A4) και η μόνη διαφορά βρίσκεται στο σύστημα ανάσχεσης ανάκρουσης (recoil) το οποίο στην περίπτωση του M1A1 είναι σπειρωτών ελατηρίων ενώ στο αντιστοιχό του Leo 2 υδραυλικό.

Το M1A1 υιοθετεί μια σειρά από βελτιώσεις όπως ένα σύστημα προστασίας NBC από χημικό-βιολογικό-πυρηνικό πόλεμο καθώς και αναβαθμισμένη θωράκιση ενισχυμένη με απεμπλουτισμένο ουράνιο. Επιπλέον διαθέτει σύστημα διέλευσης βαθύ υδάτινου κωλύματος, σύστημα PLRS ευρεσης θέσης-τοποθεσίας, Ψηφιακή Ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου (DECU) που βοηθάει εκτός των άλλων στην εξοικονόμηση καυσίμου.

Για λόγους μελλοντικής cost-effective υποστήριξης, καθώς και για αύξηση των συνολικών δυνατοτήτων του άρματος αναπτύχθηκε μια ακόμη έκδοση η M1A1D που ενσωματώνει τεχνολογίες που περνάνε το M1A1 στην πλήρη ψηφιακή εποχή αντικαθιστώντας το TNB και HNB (turret and hull network box) όπως και νέα επιπλέον

θωράκιση που μπορεί να μπει επιπρόσθετα. Παράλληλα ενσωματώνεται 2 γενιάς FLIR κάμερα (ίδιας με αυτή της έκδοσης M1A2) αυξάνοντας την ταχύτητα πρόσκτησης στόχων, ακρίβεια, επίγνωση της κατάστασης και κατεπέκταση φονικότητας του άρματος.



Σχήμα 5: Απεικόνιση M1A2

Με το πυροβόλο M256 των 120 mm το M1A1 μπορεί να εμπλέξει στόχους αποτελεσματικά σε αποστάσεις 4 km (αποδεδειγμένα σε πραγματικές επιχειρήσεις στην Desert Storm). Το κύριο βλήμα που χρησιμοποιείται εναντίον αρμάτων είναι το M829 120 mm, APFSDS-T ενισχυμένο από απεμπλουτισμένο ουράνιο. Το απεμπλουτισμένο ουράνιο έχει 2.5 φορές υψηλότερη αντοχή από το ατσάλι (όπως και βάρος 1.7 φορές μεγαλύτερο) και χάρη σε αυτό του το χαρακτηριστικό το M829A1 είναι ένα από τα πιο φονικά βλήματα διάτρησης θωράκισης αρμάτων με το μεγαλύτερο hit/kill ratio. Επιπλέον το απεμπλουτισμένο ουράνιο με το οποίο είναι κατασκευασμένο το βλήμα όταν χτυπάει στο στόχο γίνεται πυροφόρο και αναπτύσσεται τρομακτική πίεση με αποτέλεσμα να λιώνει το μέταλλο της αντίπαλης θωράκισης και το υπόλοιπο τμήμα του βλήματος που δεν έχει λιώσει να εισέρχεται μαζί με λιωμένα τμήματα της θωράκισης στο εσωτερικό του αντίπαλου οχήματος και να προσκρούει σε οτιδήποτε δημιουργώντας ανάφλεξη-πυρκαγιά. Στις περισσότερες των περιπτώσεων τα θραύσματα βρίσκουν το τμήμα βλημάτων -οπλισμού όπου η παραμικρή έκρηξη οδηγεί στην έκρηξη των βλημάτων που υπάρχουν μέσα στον πύργο του αντίπαλου άρματος και διάλυση από μέσα του πύργου. Ο οπλισμός του συμπληρώνεται από ένα M2 Browning 12.7 mm με μεγεθυντική διόπτρα 3x για τον commander, ένα ομοαξονικό με το κύριο πυροβόλο M240 7,62 mm και άλλο ένα 7,62 mm M240 στον πύργο.

1.16.1. Εξοπλισμός M1A1

Η θέση του Αρχηγού πληρώματος διαθέτει έξι περισκόπια που προσφέρουν κάλυψη 360 μοιρών. Επιπλέον μια ανεξάρτητη θερμική κάμερα (ITV) κατασκευής της Texas Instruments προσφέρει 360 μοιρών σταθεροποιημένη θερμική παρατήρηση μέρα και νύχτα καθώς επίσης και λειτουργίες όπως automatic sector scanning, automatic target cueing (αυτόματη ανάθεση στόχου στον πυροβολητή χωρίς να χρειάζεται προφορική επικοινωνία)

και ένα πλήρες σύστημα back-up έλεγχου πυρός για τον αρχηγό πληρώματός όπου μπορεί να εμπλέξει ο ίδιος ανεξάρτητα από τον πυροβολητή τους στόχους. Έτσι η ύπαρξη δυνατότητας hunter-killer όπως και η φονικότητα των πυρομαχικών απεμπλουτισμένου ουρανού επιτρέπει την ταχεία πρόσκτηση στόχων και την άμεση αποτελεσματική εμπλοκή τους.

Ο πυροβολητής διαθέτει ένα ηλεκτρο-οπτικό σκοπευτικό κατασκευής Hughes Aircraft Company καθώς επίσης και επίσης και του συστήματος TIS (night vision thermal). Το σύστημα πλαισιώνεται από ένα αποστασιόμετρο laser μέτρησης της απόστασης του χτόχου επίσης της Hughes με ακρίβεια +/-10 μέτρων. Το ψηφιακό σύστημα ελέγχου πυρός του M1A1 abrams το οποίο συνδυάζει τα δεδομένα του αποστασιόμετρου laser ,την ταχύτητα του ανέμου ,την γωνία πρόσκτησης, τη γωνία κλίσης του όπλου ,καθώς και δεδομένα από ένα στατικό εκκρεμές αισθητήρα κλίσης στο κέντρο του πύργου. Ο χειριστής -πυροβολητής (ακόμη και ο αρχηγός πληρώματος) εισάγει τα δεδομένα βαρομετρικής πίεσης, τύπου πυρομαχικού και θερμοκρασίας καθιστώντας το όπλο έτοιμο για βολή.

Η θέση του οδηγού βρίσκεται στο κέντρο του σκάφους του άρματος και διαθέτει περισκόπιο 120 μοιρών καθώς και σύστημα νυχτερινής όρασης. Το σύστημα επιτρέπει την οδήγηση υπό δύσκολες συνθήκες ορατότητας όπως κάτω από πυκνή ομίχλη-σκόνη καθώς και σε συνθήκες πλήρους συσκότισης όπως τη νύχτα. Ο πύργος πλαισιώνεται από 2 6-pack συστήματα εκτόξευσης καπνογόνων ένα στην κάθε πλευρά του πύργου. Παράλληλα όπως σε πολλά άρματα υπάρχει δυνατότητα μέσω της μηχανής που το κινεί να δημιουργηθεί τείχος καπνού.

Μία από τις πιο ενδιαφέρουσες τροποποιήσεις της σειράς M1A1 ήταν η νέα σύνθετη θωράκιση συμπεριλαμβανομένων απεμπλουτισμένου ουρανού (DU) πλακών. Αυτή η θωράκιση αυξάνει σημαντικά την αντίσταση ενάντια σε κινητικής ενέργειας βλήματα. Κατά τη διάρκεια του Πολέμου του Κόλπου, M1A1 άρματα μπορούσαν να εμπλακούν άμεσα εναντίον αρμάτων του εχθρού παρόλο που βρίσκονταν μέσα στο line of sight εχθρικών σκοπευτικών με μικρό κίνδυνο από ενδεχόμενη ζημιά από βολές εχθρικών βλημάτων λόγω της πολύ ισχυρής μπροστινής τους θωράκισης ειδικά σε μακρινές αποστάσεις που το εχθρικό βλήμα έχει χάσει μέρος της κινητικής του ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι τα M1A1 άρματα μπορούσαν να πλήξουν τους στόχους τους, ενώ παράλληλα τα ιρακινά T-72 αν τα χτυπούσαν, δεν θα μπορούσαν να διατηρήσουν τη θωράκιση των M1A1. Επίσης, λόγω της θωράκισης απεμπλουτισμένου ουρανού, ούτε ένα περιστατικό διάτρησης δεν σημειώθηκε. Αμερικανικά M1A1 δέχτηκαν πολλά εχθρικά πυρά από κοντινή απόσταση από Ιρακινά σοβιετικής κατασκευής T-72 και T-72 M, αλλά τα βλήματα δεν ήταν απλώς σε θέση να διεισδύσουν τη θωράκιση του M1A1. Το μοντέλο που είχε αυτό το χαρακτηριστικό ονομαζόταν M1A1 HA (Heavy Armor), και είχε θωράκιση που ισοδυναμεί με 600 mm εναντίον βλημάτων κινητικής ενέργειας (APFSDS), και 1.300 mm έναντι χημικής ενέργειας βλημάτων (ATGM και HEAT). Χαρακτηριστικά μπορούμε να αναφέρουμε πως σε περίπτωση διάτρησης της θωράκισης από εχθρικό βλήμα HEAT οι πάνω θωρακισμένες πλάκες DU απεμπλουτισμένου ουρανού εκρήγνυνται προς τα έξω αντισταθμίζοντας τη ζημιά.

Πέρα από τη θωράκιση απεμπλουτισμένου ουρανού που διαθέτει το άρμα για τον πύργο έχουν γίνει κατάλληλες τροποποιήσεις ώστε η αποθήκη οπλισμού των πυρομαχικών - βλημάτων να βρίσκονται πίσω από θωρακισμένες θύρες ασφαλείας μέσα σε θωρακισμένα πλαίσια. Έτσι ακόμη και αν κάποιο εχθρικό βλήμα διατρήσει τον πύργο η πιθανότητα να διαπεράσει και την εσωτερική θωράκιση της αποθήκης οπλισμού όπως και των θωρακισμένων πλαισίων αυξάνει την επιβιωσιμότητα του άρματος και μειώνει τη πιθανή ζημιά που μπορεί να προκληθεί.

1.16.2. Κινητήρας M1A1

Αφήσαμε το μελανό σημείο του M1A1 για το τέλος .Ο κινητήρας του M1A1 Abrams είναι ο Honeywell AGT 1500 hp συνδεδεμένος με το Allison X-1100-3B κιβώτιο ταχυτήτων με 4 ταχύτητες για εμπρός κίνηση και 2 ταχύτητες για όπισθεν. Ο συγκεκριμένος κινητήρας είναι στροβιλοκινητήρας ο οποίος με σωστή εργοστασιακή συντήρηση έχει θεωρητικά «άπειρη διάρκεια» ζωής. Παρολαυτά η υψηλή του κατανάλωση η οποία είναι διπλάσια σε σχέση με το Leo2 το καθιστά εξαιρετικά κοστοβόρο ενώ έχει και σαν αντίκτυπο στην επιχειρησιακή του εμβέλεια η οποία είναι γύρω στα 440 km σε σχέση με τα 550 km του Leo2 (τιμή για cruising speed , όχι τη μέγιστη ταχύτητα που αναπτύσσεται στο πεδίο της μάχης).

Σε δοκιμές που έχουν γίνει ο αεριοστρόβιλος καταναλώνει απίστευτα στις υψηλές στροφές και στις υψηλές ταχύτητες με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται μονάχα στη διάρκεια της μάχης. Σε δοκιμές παρατηρήθηκε διπλάσια κατανάλωση σε σχέση με το Leo 2. Επιπλέον το 68% των προβλημάτων συντήρησης εντοπίζονται σε αυτόν με αποτέλεσμα ο αμερικανικός στρατός να προχώρησε σε μια σειρά αναβαθμίσεων για να μειώσει το κόστος αλλά και να αυξήσει και τη διαθεσιμότητα.

1.16.3. Συμπεράσματα

Προσωπική άποψη του γράφοντος είναι ότι παρόλη τη σημαντική αυτή παράμετρο της κατανάλωσης καυσίμου σε συνθήκες μάχης που κάνει τον ανεφοδιασμό σε καύσιμα πιο συχνό το συγκεκριμένο άρμα μάχης κατατάσσεται το 2ερο καλύτερο στον κόσμο σε συνολικά χαρακτηριστικά. Ειδικά η θωράκιση του και η χρήση πυρομαχικών απεμπλουτισμένου ουρανίου το καθιστούν ιδιαίτερα φονικό και hard to kill. Η πιθανή μελλοντική του απόκτηση τον προσεχή καιρό από τον ελληνικό στρατό καθώς και ένα πρόγραμμα απόσυρσης όλων των υπόλοιπων αρμάτων μάχης που υπηρετούν σήμερα στον ΕΣ εκτός από τα Leo 2 θα δημιουργήσουν ένα στόλο γύρω στα 800 άρματα μάχης συνολικά 3ης γενιάς τα οποία επαρκούν για την κάλυψη κάθε παρούσας και μελλοντικής απειλής. Μερικά Leo 1 A5 μπορούν να παραμείνουν σε υπηρεσία μέχρι την πλήρη αξιοποίηση τους.

Αυτό που απαιτείται είναι σωστός προγραμματισμός και οργάνωση τόσο σε οικονομικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο ένταξης τους στις αντίστοιχες μονάδες. Δε χρειαζόμαστε σαβούρες του πολέμου του Βιετνάμ και της κορέας. M48A5 καθώς και Leo 1A5 μπορούν είτε να πωληθούν είτε να χρησιμοποιηθούν για άλλους σκοπούς. Μια πιθανή προμήθεια M2A2 Bradley θα δημιουργήσει ένα σύγχρονο σχηματισμό στον Έβρο όπου με κατάλληλη εκπαίδευση δεν έχει σε τίποτα να ζηλέψει σε σχέση με τους υπόλοιπους στρατούς.

Επειδή όμως η θωράκιση DU στα άρματα μάχης M1 Abrams είναι πρόσθετη, δηλαδή τοποθετείται σε δύο θήκες εκατέρωθεν του πυροβόλου, στα εμπρόσθιο μέρος του πύργου, η αφαίρεση της είναι πολύ εύκολη. Διαφοριστικό για τη θέση της θωράκισης είναι το ακόλουθο σχήμα.

Εξάλλου και η τοποθέτηση της θωράκισης DU στο Abrams έγινε εκ των υστέρων (**το άρμα σχεδιάστηκε και παράχθηκε για να φέρει την περιβόητη θωράκιση Chobham, που πήρε την ονομασία της από το βρετανικό ερευνητικό κέντρο που την ανέπτυξε**), δηλαδή μετά την παραγωγή σειράς του άρματος, με τον ίδιο τρόπο. Μην ξεχνάμε ότι σύμφωνα με πληροφορίες η **συγκεκριμένη θωράκιση βρίσκεται στην τρίτη γενιά της**, και αυτή ακριβώς η σπονδυλωτή μορφή της επιτρέπει και τον εκσυγχρονισμό του αρματικού δυναμικού του αμερικανικού Στρατού.

Επισημαίνεται επίσης, ότι οι ιατρικές παρενέργειες του DU εμφανίζονται **ΜΟΝΟ** στην περίπτωση που η συγκεκριμένη θωράκιση έχει ολοσχερώς διατηρηθεί και υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Με άλλα λόγια απλώς η ύπαρξη της στο άρμα δεν εγκυμονεί από μόνη της οποιουδήποτε κινδύνους για το προσωπικό που υπηρετεί καθώς είναι αδρανής και εμπεριέχεται σε ειδικές θήκες για επιπλέον προστασία.

2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα διάφορα είδη ακτινοβολιών που μέχρι σήμερα έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί δεν ανιχνεύουν μόνον τις πυρηνικές ακτινοβολίες άλφα, βήτα και γάμμα που αναπτύχθηκαν διεξοδικά αλλά και άλλα είδη ακτινοβολιών όπως ακτινοβολίες βαρέων ιονιστικών σωματίων (πρωτονίων, πυρήνων ${}^3_2\text{He}$, ${}^7_3\text{Li}$ η και βαρύτερων), ακτινοβολίες από στοιχειώδη σωματίια στα διάφορα πειράματα της Φυσικής Υψηλών Ενεργειών, ακτινοβολία νετρονίων, κοσμική ακτινοβολία, ακτίνες-X, κ.λ.π.

Η μορφή και το μέγεθος των ανιχνευτών εξαρτάται κύρια από τη γεωμετρία με την οποία ο ανιχνευτής «βλέπει» την ακτινοβολία μικρή η μεγάλη στερεά γωνία (μεγάλη η μικρή απόσταση πηγής ακτινοβολίας-απαριθμητή), την ενέργεια που μεταφέρει η ακτινοβολία ή άλλως την εμβέλειά της και πολλές φορές την ένταση και τον χρόνο μέτρησης της ακτινοβολίας που συνεπάγονται την καλύτερη στατιστική στις μετρήσεις και τις περισσότερες φορές επιζητείται. Ποικιλία όσα απαριθμητικά συστήματα και διατάξεις έχουν σχεδιαστεί για την καλύτερη (ακριβέστερη) και ταχύτερη ανίχνευση-μέτρηση των πυρηνικών ακτινοβολιών με την εξέλιξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών (κομπιούτερς) όπου κατάλληλα προγράμματα εξυπηρετούν προς το σκοπό αυτό.

Αναφέρονται κατά κυριότητα οι εξής απαριθμητές: Θάλαμος ιονισμού, αναλογικός απαριθμητής, απαριθμητής Geiger-Muller, απαριθμητής σπινθηρισμών, απαριθμητές στερεάς κατάστασης (απαριθμητές Ge, Ge-Li και Si-Li), απαριθμητές θερμοφωταύγειας, πλαστικοί ανιχνευτές ιχνών, απαριθμητής Cerenkov, θάλαμος νέφους η θάλαμος Wilson, θάλαμος φυσαλίδων, θάλαμος σπινθήρων, απαριθμητής BF_3 , θάλαμος σχάσης κ.λ.π. Εδώ θα περιγραφούν ορισμένοι μόνο απ' αυτούς που ενδιαφέρουν κύρια τις πυρηνικές ακτινοβολίες. Θα δοθεί δηλαδή σε γενικές γραμμές η αρχή ανίχνευσης και μέτρησης των πυρηνικών ακτινοβολιών με τους ανιχνευτές αυτούς.

2.2. ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ GEIGER-MULLER

Ο ανιχνευτής Geiger-Muller η απλά ανιχνευτής G-M είναι το πιο απλό όργανο ανίχνευσης πυρηνικών ακτινοβολιών. Ανιχνευτές G-M υπάρχουν διαφόρων τύπων. Ο πιο συνηθισμένος τύπος ανιχνευτή G-M είναι ο του «παραθύρου» (endwindow). Η μορφή του είναι κυλινδρική. Στην ουσία ο ανιχνευτής G-M είναι ένας ιδιαίτερος τύπος θαλάμου ιονισμού, του οποίου τα τοιχώματα (το περίβλημα) του κυλίνδρου αποτελούν το ένα ηλεκτρόδιο, το εξωτερικό, ενώ το εσωτερικό ηλεκτρόδιο, ο συλλέκτης, αποτελείται από πολύ λεπτό σύρμα με πολύ μικρή διάμετρο σε σχέση προς την διάμετρο του εξωτερικού ηλεκτροδίου που είναι το περίβλημα του ανιχνευτή. Η μια από τις βάσεις του ανιχνευτή είναι από μονωτικό υλικό π.χ. βακελίτη η πισσεΐνη από την οποία διέρχεται το σύρμα, ενώ η άλλη βάση είναι το «παραθύρο» του ανιχνευτή, από λεπτό φύλλο μίκας, βηρυλλίου, χρυσού η αλουμινίου, υλικά με μικρό συντελεστή απορρόφησης για τις ακτινοβολίες που χρησιμοποιείται, έτσι που να επιτρέπουν με ευκολία τη διέλευση των ακτινοβολιών μέσα

στον ευαίσθητο όγκο του ανιχνευτή. Από το πάχος του παραθύρου που είναι της τάξης 1 με 3.5 mg/cm^2 ή 3.5 με 12 μm μίκας, εξαρτάται το είδος των σωματίων που θα ανιχνεύσει ο G-M. Το γέμισμα του ανιχνευτή G-M είναι διάφορα αέρια όπως π.χ. Ne, Ar, αλογόνο ή μείγμα αερίων όπως π.χ. το αέριο P10 που αποτελείται από 90% αργό και 10% μεθάνιο.

Για την ανίχνευση σωματιδίων μιας ακτινοβολίας, εφαρμόζεται μια διαφορά δυναμικού μεταξύ του σύρματος και του περιβλήματος για την δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου (της τάξης των 60.000 Volts/cm). Όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο (ιονιστικό) διέλθει μέσα από το ηλεκτρικό πεδίο, δημιουργείται από την αλληλεπίδραση του σωματιδίου αυτού με τα άτομα του υλικού-αερίου γεμίσματος π.χ. αργό, του ανιχνευτή, ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-ιόντος (ιονισμός). Τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται από το άτομο αποκτούν αρκετή κινητική ενέργεια από το ηλεκτρικό πεδίο, ικανή να προκαλέσει νέο ιονισμό, κινούμενα προς το θετικό ηλεκτρόδιο, την άνοδο, στην προκειμένη περίπτωση το σύρμα. Αλληπάλληλοι ιονισμοί λαβαίνουν χώρα, ώσπου τα ηλεκτρόνια φθάνουν γύρω στο σύρμα κι έτσι έχουμε το φαινόμενο της χιονοστιβάδας. Τα θετικά ιόντα κινούνται προς το αντίθετο ηλεκτρόδιο, δηλαδή στο περίβλημα, κάθοδος.

Ο παλμός που παράγεται τελικά από την αλληλεπίδραση του φορτισμένου σωματίου με το αέριο γέμισμα του ανιχνευτή είναι ανεξάρτητος από το αρχικό αριθμό ηλεκτρονίων που δημιούργησε αυτό το ίδιο το σωματίο. Είναι αρκετά μεγάλος και μπορεί να μετρηθεί, χωρίς να χρειάζεται περισσότερες φορές ενίσχυση, με τους καταμετρητές παλμών. Το ύψος του παλμού για κάθε ένα ανιχνευτή G-M εξαρτάται από τη διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται και όχι από το είδος και την ενέργεια του σωματιδίου που ανιχνεύει.

Έτσι ο ανιχνευτής G-M ανιχνεύει όλα τα φορτισμένα σωματίδια π.χ. ακτίνες άλφα, ακτίνες βήτα, αρκεί να εισέλθουν μέσα σ' αυτόν, χωρίς όμως να μπορεί και να τα διακρίνει αν δηλαδή είναι άλφα ή βήτα ούτε και πόση ενέργεια έχουν. Ανιχνεύει επίσης και τις ακτίνες-γ, ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία-φωτόνια που δεν φέρουν φορτίο, έμμεσα, με ένα από τα τρία φαινόμενα που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση των ακτινών γάμμα με την ύλη, το γέμισμα και κατά κυριότητα το περίβλημα του ανιχνευτή, δηλαδή με φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (παράγονται φορτισμένα σωματίδια, τα φωτοηλεκτρόνια), με φαινόμενο Compton (παράγονται τα ηλεκτρόνια Compton) και με δίδυμη γένεση (παράγεται το ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου). Μόνο το 1 με 2% από τις γάμμα που προσπίπτουν στον ανιχνευτή G-M ανιχνεύονται (μικρή απόδοση).

Για να τεθεί σε λειτουργία ένας ανιχνευτής G-M, να μπορεί δηλαδή να ανιχνεύει σωστά την ακτινοβολία που ενδιαφέρει, ακολουθείται η εξής διαδικασία:

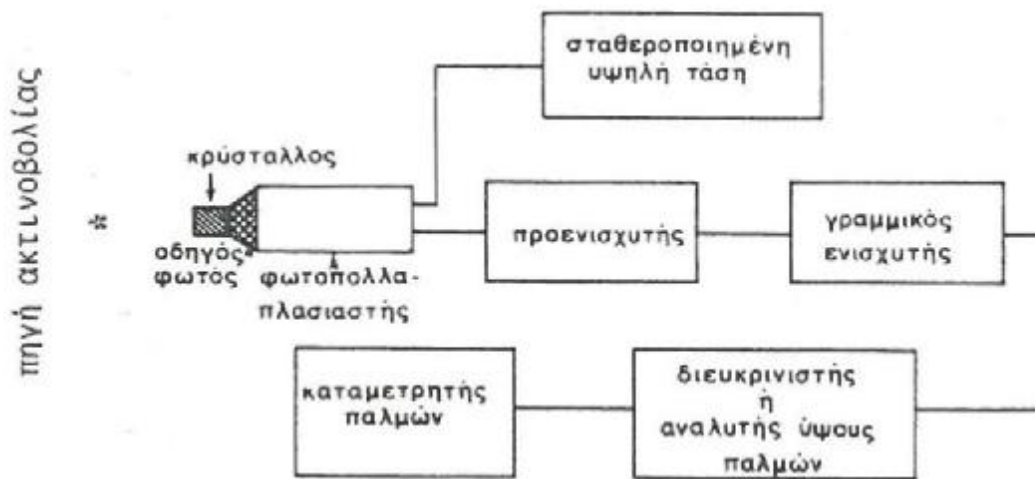
Θέτουμε ένα ραδιενεργό παρασκεύασμα-πηγή ακτίνων άλφα ή βήτα κατά κυριότητα ή και ακτίνων - γάμμα, μπροστά από το παράθυρο του ανιχνευτή. Στη συνέχεια εφαρμόζουμε διαφορά δυναμικού μεταξύ του σύρματος και του περιβλήματος του ανιχνευτή. Από κάποια τιμή της υψηλής τάσης και έπειτα οι παλμοί που παράγονται, έχουν αρκετό ύψος, της τάξης μερικών Volts και είναι μετρήσιμοι με τον καταμετρητή παλμών που σε συνεργασία με χρονόμετρο και με δυνατότητα προ ρύθμισης του χρόνου, μπορούμε να έχουμε το πλήθος των καταμετρηθέντων παλμών, ή άλλως, των ανιχνευθέντων ακτίνων στη μονάδα του χρόνου, δηλαδή τον ρυθμό, R, σε κρούσεις ανά λεπτό ($\text{cpm} = \text{counts per minute}$) συνήθως. Για κάθε μία τιμή της υψηλής τάσης, V_i , έχουμε τον αντίστοιχο ρυθμό, R_i .

2.3. ΑΠΑΡΙΘΜΗΤΗΣ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΜΩΝ (SCINTILLATION DETECTOR)

Ο απαριθμητής σπινθηρισμών είναι ο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενος για την ανίχνευση και τον ποσοτικό προσδιορισμό (φασματοσκοπία) των ακτίνων άλφα, βήτα και γάμμα (κατ' εξοχή).

Ο απαριθμητής σπινθηρισμών αποτελείται από τον κρύσταλλο-σπινθηριστή και από τον φωτοπολλαπλασιαστή, που αποτελούν ένα ολοκληρωμένο σύνολο. Το σύστημα της ανίχνευσης ραδιενεργών ακτινοβολιών ή άλλως το σύστημα φασματοσκοπίας, αποτελείται από τον απαριθμητή σπινθηρισμών, το κύριο όργανο του συστήματος και από μία σειρά ηλεκτρονικών συσκευών, όπως η μονάδα υψηλής τάσης, ο προενισχυτής και ο γραμμικός ενισχυτής (ενισχυτής φασματοσκοπίας), ο αναλυτής του ενός καταφλίου, ή καναλιού, ο καταμετρητής παλμών που καταγράφει τις κρούσεις και το χρονόμετρο που συνεργάζεται με τον καταμετρητή.

Τις ηλεκτρονικές μονάδες: αναλυτής του ενός καταφλίου, SCA (single channel analyzer), καταμετρητής και χρονόμετρο, συνήθως αντικαθιστά ο αναλυτής ύψους παλμών πολλών καναλιών (MCA = multi-channel analyzer, ή PHA = pulse height analyzer). Ένα διάγραμμα του συστήματος της ανίχνευσης ραδιενεργών ακτινοβολιών με απαριθμητή σπινθηρισμών παρουσιάζεται στο σχήμα 3.3. Σήμερα χρησιμοποιείται αντί του MCA συνδυασμός ενός ADC (analog-to-digital converter) πολλών εισόδων (4096 ή 8192) και ενός personal computer, PC.



Σχήμα 6: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος ανίχνευσης ραδιενεργών ακτινοβολιών με απαριθμητή σπινθηρισμών

Η αρχή ανίχνευσης των ραδιενεργών ακτινοβολιών με απαριθμητή σπινθηρισμών έχει συνοπτικά ως εξής: Όταν διέλθει ιονιστικό σωματίο π.χ. ακτίνες α , β ή ηλεκτρόνια της αλληλεπίδρασης ακτίνων γ με τα υλικά του κρυστάλλου, μέσω των φαινομένων :α)φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, β)φαινόμενο Compton και γ) δίδυμη γένεση, ο κρύσταλλος διεγείρεται και κατά την αποδιέγερσή του που είναι σχεδόν ταυτόχρονη, παράγεται φως φθορισμού (σπινθήρας) μέσα στον κρύσταλλο. Τα φωτόνια αυτά(το φως φθορισμού) βοηθώντας και του ανακλαστή οδηγούνται με τον αγωγό φωτός και τελικά πέφτουν πάνω στην φωτοκάθοδο, του φωτοπολλαπλασιαστή από την οποία εξάγουν ηλεκτρόνια (φωτοηλεκτρόνια). Τα ηλεκτρόνια αυτά πολλαπλασιάζονται αναλογικά, μέχρι περίπου 10^6 φορές, με το σύστημα των δυνόδων (ηλεκτρόδια φορτισμένα σε δυναμικό που βγαίνει αυξανόμενο) και στην τελευταία δύνοδο που είναι η άνοδος παίρνεται μετρήσιμος ηλεκτρικός παλμός, της τάξης των 555000 με 100 mV, που μπορούμε να παρατηρήσουμε με τον παλμογράφο. Το πλήθος των παλμών που έχουν διάφορα ύψη, ανάλογα με την ενέργεια των ακτίνων άλφα, βήτα, γάμμα που έχει αποθεθεί στον κρύσταλλο, αφού μορφοποιηθούν κατάλληλα οι παλμοί με τον προενισχυτή, ενισχύονται γραμμικά με τον ενισχυτή φασματοσκοπίας και στην συνέχεια αναλύονται κατά το ύψος-κατά την ενέργεια των ακτίνων

άλφα, βήτα ή γάμμα-με τον αναλυτή ύψους παλμών και καταμετρούνται. Έτσι λαβαίνεται το φασματογράφημα.

Στο φασματογράφημα παρατηρούνται: α) Οι φωτοκορυφές E_0 , β) η κορυφή οπισθοσκέδασης και η αιχμή Compton, οι δύο μαζί έχουν άθροισμα την E_0 , γ) η κορυφή 511 keV της εξαύλωσης ποζιτρονίου, όταν λαμβάνει χώρα και δ) οι «διαφεύγουσες κορυφές» ήτοι η απλή διαφεύγουσα κορυφή, SEP (=single escape ring) με ενέργεια $E_0 - 0.511 \text{ MeV}$ και η διπλή διαφεύγουσα κορυφή, DEP (=double escape ring) με ενέργεια $E_0 - 2 \times 0.511 \text{ MeV} = E_0 - 1.022 \text{ MeV}$. Ακόμη μπορεί να παρατηρηθεί κορυφή αθροίσματος π.χ. με ενέργεια $E_{\gamma} + E_{\gamma 2}$, δύο διεκεκριμένων γ_1 και γ_2 , κάτι που επιτυγχάνεται πολύ εύκολα στους απαριθμητές τύπου φρέατος (welltype).

Τα εναλλακτικά κανάλια αντίδρασης της ακτινοβολίας γάμμα με τα υλικά του απαριθμητή (του κρυστάλλου NaI (TI) και του κάστρου θωράκισης του υλικού Pb, δείχνονται στο Σχ.

Η ενέργεια των ηλεκτρονίων Compton θα είναι μεταξύ των τιμών μηδέν και της $(T_e)_{\max} = \frac{E_0}{1 + 0.511/2E_0}$ και στο φασματογράφημα θα εμφανιστεί σαν αιχμή Compton. Τα σκεδαζόμενα φωτόνια Compton θα έχουν ενέργεια $(E_{bs})_{\min} = \frac{E_0}{1 + 2E_0/0.511}$ και στο φασματογράφημα θα εμφανιστεί η ενέργεια αυτή σαν κορυφή οπισθοσκέδασης (bs=backscattered ring).

Το σύστημα της φασματοσκοπίας με απαριθμητή σπινθηρισμών πριν χρησιμοποιηθεί βαθμολογείται με πρότυπες πηγές ακτίνων άλφα, βήτα ή γάμμα, γνωστών ενεργειών. Έτσι βρίσκεται η αντιστοιχία της ενέργειας της φασματικής γραμμής (κορυφή του φασματογραφήματος) με την τιμή του κατωφλίου (το κανάλι) του αναλυτή ύψους παλμών (καμπύλη ενεργειακής βαθμολογίας) και ελέγχεται η γραμμικότητα (linearity) του συστήματος φασματοσκοπίας.

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του απαριθμητή σπινθηρισμών είναι η **διακριτική του ικανότητα** (resolution). Αυτή ορίζεται ως:

$$\delta = \frac{\Delta E}{E} * 100\% \quad [2.1]$$

Όπου:

ΔE = το πλήρες εύρος στο ήμισυ του μεγίστου της φωτοκορυφής,

FWHM = full width at half maximum

E = η ενέργεια της φωτοκορυφής.

Π.χ. για ένα απαριθμητή σπινθηρισμών NaI (TI) μια καλή τιμή για τη διακριτική του ικανότητα είναι 6,5% για τις γάμμα με ενέργεια 0.662 MeV του ^{137}Cs . Όσο μικρότερο δ (ως προς το μέγεθος του αριθμού) έχει ένας απαριθμητής σπινθηρισμών τόσο καλύτερη –άριστη– είναι η διακριτική του ικανότητα.

Η διακριτική ικανότητα δ , του απαριθμητή σπινθηρισμών σαν συνάρτηση της μετρούμενης ενέργειας των ακτίνων γάμμα, E δίνεται από την σχέση $\delta^2 = \alpha + \beta/E$ όπου α και β σταθερές (Π.χ. $\alpha = 1.11 \times 10^{-3}$ και $\beta = 4.06 \times 10^{-3}$ για απαριθμητή NaI (TI) 2,5" x 6"). Ένα άλλο, εξίσου σημαντικό, χαρακτηριστικό του απαριθμητή σπινθηρισμών είναι το **μέτρο αξίας του απαριθμητή**, FOM (=figure of merit). Αυτό ορίζεται ως ο λόγος E^2 / B όπου E είναι η απόδοση του ρυθμού κρούσεων του δείγματος, ήτοι ο λόγος του καθαρού ρυθμού κρούσεων προς την απόλυτη ενεργότητα του δείγματος και B (background) το υπόστρωμα, ό,τι μετράει δηλαδή ο απαριθμητής χωρίς το δείγμα. Όπως είναι αυτονόητο, για να είναι καλές οι μετρήσεις θα πρέπει η απόδοση στον ρυθμό κρούσεων δεδομένου δείγματος (π.χ. ραδιενεργού πηγής) να είναι μέγιστη, μάλιστα το E είναι στο τετράγωνο, αφετέρου δε το υπόστρωμα B , να έχει τον μικρότερο δυνατό ρυθμό.

Το υπόστρωμα μπορεί να γίνει μικρό: α) με την επιλογή υλικών του απαριθμητή με πολύ χαμηλή ραδιενέργεια, σε πολλές πειπτώσεις τα υλικά αυτά είναι τιτλοδοτημένα (labelled), β) με την απομάκρυνση άλλων ραδιενεργών πηγών από το σύστημα μετρήσεων και γ) με την προάσπιση του απαριθμητή με τον αντιαπαριθμητή ή με θωράκιση του με βαρύ κάστρο από σίδηρο ,μόλυβδο ή υδράργυρο ή συνδυασμό των ανωτέρω που έχουν ελεγχθεί προηγούμενα για την ραδιενέργειά τους. Για μετρήσεις με χαμηλό υπόστρωμα θα αναφερθούμε και σε επόμενα κεφάλαια.

Ο απαριθμητής σπινθηρισμών διατίθεται σήμερα για μετρήσεις φασματοσκοπικών αναλύσεων σε διάφορες διαστάσεις π.χ. 1'' x 1'', 1.5''x2'', 2''x 2'', 3''x 3'', 9''x 9'' και 12''x 12''. Το πρώτο νούμερο αντιστοιχεί στη διάμετρο του κυλινδρικού κρυστάλλου και το δεύτερο στο ύψος του. Οι διαστάσεις όπως είναι φανερό ,εκφράζουν τις ίντσες.

2.4. ΑΠΑΡΙΘΜΗΤΕΣ Ge , Ge-Li ΚΑΙ Si-Li

Ένα άλλο είδος απαριθμητών που χρησιμοποιείται σήμερα ευρέως για την ανίχνευση ακτίνων άλφα, βήτα, γάμμα είναι οι απαριθμητές στερεάς κατάστασης Ge ,Ge-Li και Si-Li. Στην ουσία οι απαριθμητές αυτοί είναι δίοδοι με κατάλληλα διαμορφωμένο ημιαγωγό Γερμανίου ή Πυριτίου. Η αρχή ανίχνευσης των ακτινοβολιών με τους απαριθμητές αυτούς έχει ως εξής:

Όταν ιονιστικό σωματίο π.χ. ακτίνες άλφα ,βήτα ή ηλεκτρόνια της αλληλεπίδρασης των ακτίνων γάμμα με την ύλη ,διέλθει μέσα από τον ευαίσθητο όγκο του απαριθμητή (τον κρύσταλλο Ge ,Ge-Li η Si-Li), τότε δημιουργούνται στην πορεία του ιονιστικού σωματιδίου ζεύγη οπών και ηλεκτρονίων ,όπως ακριβώς συμβαίνει με τα θετικά και αρνητικά ιόντα στον απαριθμητή Geiger-Muller. Οι οπές (θετικές) οδεύουν προς το αρνητικό ηλεκτρόδιο ,ενώ τα ηλεκτρόνια προς το θετικό ηλεκτρόδιο. Η κίνηση φορτίου ως γνωστόν από τον ηλεκτρισμό, ισοδυναμεί με ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο προκαλεί μία πτώση τάσης στο άκρο αντίστασης RC. Ο παλμός στην έξοδο είναι ανάλογος της ενέργειας του ιονιστικού σωματιδίου που έχει αποτεθεί μέσα στον ευαίσθητο όγκο του απαριθμητή (του κρυστάλλου). Οι πλαμοί αυτοί αφού διαμορφωθούν κατάλληλα, με τον προενισχυτή ύψους 50 με 100 Mv, ενισχύονται γραμμικά με ενισχυτή φασματοσκοπίας μέχρι ύψους 10 V και στη συνέχεια αναλύονται με αναλυτή ύψους παλμών τους ενός ή πολλών καναλιών που είναι και οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενοι, βλέπε προηγούμενη παράγραφο.

Οι απαριθμητές Ge ή Ge-Li με μεγάλο ευαίσθητο όγκο χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση των ακτίνων γάμμα, μέχρι και 20 MeV ενώ οι απαριθμητές Si-Li μικρού σχετικά ευαίσθητου όγκου χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ακτίνων άλφα βήτα και ακτίνων-X ως και μικρής ενέργειας ακτίνων γ. Είναι πολύ γνωστοί οι απαριθμητές Si-Li επιφανειακού φράγματος (surfacebarrier). Για γάμμα μικρής ενέργειας μέχρι 150 keV ως και για ακτίνες X χρησιμοποιούνται επίσης οι απαριθμητές υπερκαθαρού Γερμανίου (intrinsic).

2.5. ΠΛΑΣΤΙΚΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΙΧΝΩΝ (NUCLEAR TRACK DETECTORS)

Οι πλαστικοί ανιχνευτές ιχνών είναι πλαστικά φιλμς νιτροσελλουλόζης επιφάνειας συνήθως 1 cm² και πάχους 200 μικρών π.χ. τύπου Kodak CA 80-15, CN-85, LR-115, Macrofol (C₁₆H₁₄O₃), Lexan, κ.ά ή φύλλα μίκας, μαρμαρύγια, οψιδιανού και διαφόρων άλλων ορυκτών της ίδιας κατηγορίας.

Η ανίχνευση των ιονιστικών σωματιδίων π.χ. ακτίνων άλφα κατ' εξοχήν, αλλά και βαρύτερων ακόμη, συνίσταται στη δίοδο ή πρόσπτωση αυτών στους ανιχνευτές, οπότε αφήνων τα ίχνη τους, ήτοι, αλλοιώνουν τον ανιχνευτή (προκαλούν διάρρηξη των μεγαλομορίων του πλαστικού). Κριτήριο εγγραφής αποτελεί ο ρυθμός απώλειας ενέργειας ανά μονάδα διαδρομής του σωματιδίου, dE/dx . Μετά την εγγραφή (registration) των ιχνών των άλφα στους ανιχνευτές αυτούς, γίνεται κατάλληλη χημική επεξεργασία (etching) με NaOH ή KOH. Η χημική διάβρωση είναι συνάρτηση της ενέργειας που είχε το σωματίδιο στα σημεία πρόσπτωσης. Στη συνέχεια γίνεται μέτρηση των ιχνών των άλφα ανά μονάδα επιφάνειας του πλαστικού ανιχνευτή με μικροσκόπιο και εκτίμηση της ενεργότητας των σωματιδίων με διάφορες μαθηματικές σχέσεις. Η απόδοση εγγραφής των ιχνών ποικίλλει στους διάφορους τύπους των ανιχνευτών.

Οι ανιχνευτές ιχνών χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα στη μέτρηση της ενεργότητας του ραδονίου: α) από πηγές του εδάφους π.χ. σε σπήλαια ή σε ρήγματα που προκλήθηκαν από σεισμούς ή άλλου είδους διαβρώσεις απ' όπου αναβλύζει, β) στα νερά και γ) στην ατμόσφαιρα. Επίσης στην εγγραφή των ιχνών σχάσης από σχάσιμα υλικά όπως το ^{235}U για ραδιοχρονολογήσεις κ.λπ., στην εγγραφή ιχνών βαρέων σωματιδίων από αντιδράσεις θρυμματισμού (spallation) ή βομβαρδισμού με πρωτόνια υψηλής ενέργειας.

2.6. ΑΠΑΡΙΘΜΗΤΕΣ ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑΣ

Η αρχή της ανίχνευσης των ιονιστικών σωματιδίων με την μέθοδο της θερμοφωταύγειας τύπου TLD 100: LiF (Mg, Ti) ή TLD 200: CaF₂ (Dy) είναι οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενοι για την μέτρηση της δόσης που επάγεται από την ακτινοβολία των ανιχνευτών που τοποθετούνται στο σημείο που μας ενδιαφέρει, με την πρόσπτωση επ' αυτών ιονιστικών σωματιδίων. Χρησιμοποιώντας κατ' εξοχήν σε ραδιοχρονολογήσεις, στην αρχαιομετρία καθώς και για δοσιμετρία προσωπικού. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνολογίες στον τομέα της θερμοφωταύγειας.

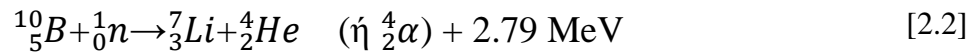
2.7. ΑΠΑΡΙΘΜΗΤΗΣ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ BF₃

Ο απαριθμητής BF₃ είναι κατάλληλος για την ανίχνευση των νετρονίων. Διακρίνει και μέτρα τα νετρόνια ανάλογα με την ενέργειά τους (αναλογικός απαριθμητής). Για να μετρήσει τα ταχέα νετρόνια περιβάλλεται με κατάλληλο δοχείο που περιέχει επιβραδυντή Παραφίνη, οπότε θερμοποιούνται (0.025 eV). Για την ανίχνευση των θερμικών νετρονίων ο ανιχνευτής λειτουργεί σαν θάλαμος ιονισμού και περιέχει σχάσιμο υλικό, π.χ. ^{235}U (θάλαμος σχάσης). Όταν θερμικά νετρόνια απορροφηθούν από σχάσιμους πυρήνες, παράγουν προϊόντα σχάσης με μέση ενέργεια ≈ 50 MeV το καθένα. Η ολική ενέργεια ανά σχάση είναι ως γνωστό ≈ 200 MeV. Οι παλμοί που παράγονται στη συνέχεια εύκολα μπορούν να ανιχνευθούν (καταμετρηθούν).

Η ανίχνευση των νετρονίων συνίσταται στα εξής. Τα νετρόνια είναι ως γνωστόν σωματίδια που δεν φέρουν φορτίο. Έτσι ανιχνεύονται έμμεσα. Όταν εισέλθουν στον ευαίσθητο όγκο του απαριθμητή που είναι πλήρης με το αέριο BF₃, επάγουν πυρηνικές αντιδράσεις με την αρπάγη τους π.χ. από πυρήνες B, από τις οποίες παράγονται ιονιστικά σωματίδια. Από εκεί και πέρα ακολουθείται η γνωστή διαδικασία με τη δράση των παραχθέντων ιονιστικών σωματιδίων μέσα στον ευαίσθητο όγκο του ανιχνευτή και την ανίχνευση τους που συνεπάγεται την ανίχνευση των νετρονίων.

Η υψηλή τάση και η ενίσχυση ρυθμίζονται κατάλληλα ώστε το ύψος των παλμών που παράγονται από τα προϊόντα της αντίδρασης (B,n) ξεπερνούν την στάθμη του διευκρινιστεί και βασικά μετρούνται μόνο νετρόνια. Ανιχνεύει νετρόνια μεγάλου ενεργειακού φάσματος, από περίπου 10 keV μέχρι περίπου 5 MeV (επιμήκης απαριθμητής), και για ροές από 10^{-3} έως $10^5 \text{ncm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$.

Η πυρηνική αντίδραση που λαβαίνει χώρα μέσα στον ευαίσθητο όγκο του απαριθμητή BF_3 είναι η εξής:



Στην αντίδραση αυτή παράγονται δύο βαρέα ιονιστικά σωμάτια, ήτοι ένα σωματίο άλφα και ο ανακρουόμενος πυρήνας Λιθίου-7 που θα προκαλέσουν ιονισμό στον ευαίσθητο χώρο του ανιχνευτή, δαπανώντας όλη τους την ενέργεια στο αέριο γέμισμα. Η ενεργός διατομή της αντίδρασης αυτής για τα θερμικά νετρόνια είναι πάρα πολύ μεγάλη, $\sigma_c = 3838.0$ barns. Το βόριο στη φύση έχει δύο σταθερά ισότοπα, το ${}^{10}_5B$ (19.8%) και το ${}^{11}_5B$ (80.2%). Το ${}^{11}_5B$ είναι μεν πλουσιότερο στη φύση, έχει όμως πολύ μικρή ενεργό διατομή με τα θερμικά νετρόνια, $\sigma_c = 0.005$ barns. Γι' αυτό γίνεται εμπλουτισμός στους απαριθμητές BF_3 σε ${}^{10}_B$ μέχρι και 95%. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου το βόριο-στόχος δεν αποτελεί το αέριο γέμισμα του ανιχνευτή αλλά αποτελεί στρώμα επικάλυψης σ' ένα από τα ηλεκτρόδια.

Στους απαριθμητές με γέμισμα ήλιου-3 η αντίδραση που λαβαίνει χώρα είναι:



Οπότε ο ιονισμός παράγεται από τα πρωτόνια και τα τριτόνια (πυρήνες τριτίου).

*Το υδρογόνο της παραφίνης λόγω της σχετικά μεγάλης ενεργού διατομής, $\sigma_c = 0.332$ barns απορροφά έντονα τα νετρόνια.

2.8. ΦΟΡΗΤΑ ΟΡΓΑΝΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ (SURVEYMETERS)

Τα ελαφρά φορητά όργανα ανίχνευσης πυρηνικών ακτινοβολιών είναι ολοκληρωμένα συστήματα απαρίθμησης με βάση απαριθμητή Geiger-Muller (G-Msurveymeter), ή απαριθμητή σπινθηρισμών (scintillometer) ή θάλαμο ιονισμού (ionizationchamber), διαφόρων μορφών και διαστάσεων. Φέρουν ένα τροφοδοτικό υψηλής τάσης για τον ανιχνευτή και ένα ρυθμόμετρο που είναι βαθμολογημένο σε κρούσεις ανά λεπτό (cpm) ή κρούσεις ανά δευτερόλεπτο (cps) με διάφορες κλίμακες επιλογής (x1, x10, x100, x1000).

Τα φορητά (portable) αυτά όργανα το μόνο που μπορούν να μας πληροφορήσουν είναι η ύπαρξη ραδιενέργειας σ' ένα χώρο (π.χ. στην ατμόσφαιρά του) ή σε κάποια επιφάνεια (π.χ. στην επιφάνεια του εδάφους) και φυσικά την έντασή της που εκφράζεται με τον μετρούμενο ρυθμό. Ως προς το είδος της ακτινοβολίας, ενέργεια κ.λπ. δεν δίνουν επαρκείς πληροφορίες.

Η βαθμολογίες τους γίνεται με πηγές αναφοράς γνωστής έντασης ${}^{137}\text{Cs}$ ή ${}^{60}\text{Co}$. Η απόδοσή τους είναι διάφορη ως προς το είδος και την ενέργεια της μετρούμενης ακτινοβολίας.

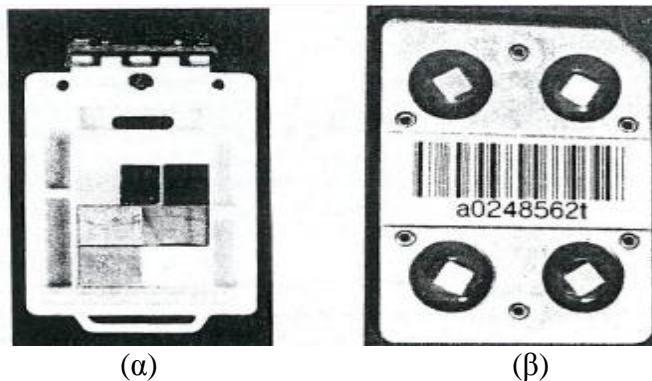


Σχήμα 7: Φορητό όργανο με θάλαμο ιονισμού διαστάσεων 2 7/8'' x 5 1/2'' και ευαίσθητου όγκου 580 cc

2.9. ΔΟΣΙΜΕΤΡΑ

Τα δοσίμετρα είναι φορητά όργανα, πολύ μικρά σε μέγεθος, που μετρούν τη **δόση*** που επάγουν οι ακτινοβολίες. Στην πραγματικότητα ανιχνεύουν ακτινοβολίες. Τα όργανα αυτά αποτελούνται από ένα θάλαμο ιονισμού ή απαριθμητή Geiger-Muller ή απαριθμητή σπινθηρισμών και από τη μονάδα υπολογισμού και απεικόνισης της δόσης στην περίπτωση που γίνεται ολοκλήρωση για κάποιο χρονικό διάστημα, ή του ρυθμού δόσης. Τα όργανα που δίνουν τον ρυθμό δόσης έκθεσης είναι βαθμολογημένα σε R/h (roentgenperhour) ή rem/h όταν υπολογίζουν την ισοδύναμη δόση (doseequivalent), στην περίπτωση των δοσιμέτρων προσωπικού.

Ευρείας χρήσης είναι τα δοσίμετρα προσωπικού. Στην κατηγορία αυτή χρησιμοποιούνται τα δοσίμετρα τύπου στυλό που είναι μικροί θάλαμοι ιονισμού που φορτίζονται πριν από τη χρήση τους και εκφορτίζονται με την ανίχνευση της ακτινοβολίας. Έχουν αντικατασταθεί από τα ψηφιακά (digitals) δοσίμετρα που η ένδειξη της μέτρησης γίνεται με LED. Πιο συχνά όμως χρησιμοποιούνται τα φωτογραφικά δοσίμετρα με φιλμ, σχήμα 5.13, για την ακτινοβολία γάμμα και X. Στην περίπτωση των νετρονίων είναι καλυμμένα με φύλλο Cd* για να θερμοποιούνται τα νετρόνια. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται τα δοσίμετρα TLD-200 που η αρχή τους στηρίζεται στο φαινόμενο της θερμοφωταύγειας, τα δοσίμετρα αυτά είναι μικροσκοπικοί κρύσταλλοι LiF (Mg, Ti) και CaF₂ (Dy) αντίστοιχα με διαστάσεις 3.17 x 3.17 x 0.99. Οι διαστάσεις εκφράζονται σε mm. Δοσίμετρα χρησιμοποιούνται και με πλαστικούς ανιχνευτές ιχνών για περίοδο τουλάχιστον ενός μηνός, οπότε δίνουν την ολοκληρωμένη δόση.



Σχήμα 8: Δοσίμετρα (α) φωτογραφικό, (β) θερμοφωταύγειας

3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΩΝ

3.1. ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΝΕΤΡΟΝΙΑ

Ενεργοποίηση είναι η σύλληψη θερμικών νετρονίων από τους πυρήνες ενός στοιχείου (υλικού). Είναι γνωστή ως αντίδραση n, γ. Οι προκύπτοντες μετά την σύλληψη νέοι πυρήνες είναι συνήθως ραδιενεργοί και συνεπώς παρατηρήσιμοι. Δίνουν έτσι τη δυνατότητα της ποσοτικής μέτρησης των πυρήνων ενός στοιχείου (συγκέντρωση υλικού) με μέτρηση της επαγόμενης ραδιενέργειας.

Ο ρυθμός σχηματισμού ραδιενεργών πυρήνων κατά την ακτινοβόληση υλικού με νετρόνια σταθερής ροής, δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{dN}{dt} = M \sigma_c \Phi - \lambda N \quad [3.1]$$

Όπου:

σ_c = ενεργός διατομή απορρόφησης νετρονίων του υλικού, cm^2 (μονάδες barns ή mbarns ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$)).

Φ = ροή των θερμικών νετρονίων, ($\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$)

λ = σταθερά διάσπασης του ραδιοϊσοτόπου που σχηματίστηκε, (sec^{-1}).

M = αριθμός πυρήνων υλικού.

N = αριθμός ραδιενεργών πυρήνων που σχηματίστηκαν.

Με ολοκλήρωση της [3.1] προκύπτει:

$$N = \frac{M \cdot \sigma_c \cdot \Phi}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_1}) \quad [3.2]$$

Όπου:

t_1 = ο χρόνος ακτινοβόλησης.

Η ενεργότητα του υλικού μετά το τέλος της ακτινοβόλησης θα ισούται με:

$$I_1 = \lambda \cdot N = M \cdot \sigma_c \cdot \Phi (1 - e^{-\lambda t_1}) \quad [3.3]$$

ενώ κατά την έναρξη της απαρίθμησης θα ισούται με

$$I_2 = I_1 e^{-\lambda t_2} = M \sigma_c \cdot \Phi (1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2} \quad [3.4]$$

Όπου:

t_2 ο χρόνος που μεσολάβησε μεταξύ τους πέρατος της ακτινοβόλησης και της έναρξης απαρίθμησης.

Αν t_3 είναι η διάρκεια απαρίθμησης, σχετικά μεγάλη (μερικά λεπτά), τότε ο χρόνος τ της απαρίθμησης (από την αρχή κάθε μέτρησης) και ο οποίος αντιστοιχεί στον μέσο ρυθμό απαρίθμησης, δίνεται από τη σχέση:

$$e^{-\lambda\tau} = \frac{1 - e^{-\lambda t_3}}{\lambda t_3} \quad [3.5]$$

και η ενεργότητα του δείγματος του υλικού κατά τον χρόνο που αντιστοιχεί στο μέσο ρυθμό απαρίθμησης θα ισούται με:

$$\begin{aligned} I_3 &= I_2 e^{-\lambda t} = M \cdot \sigma_c \cdot \Phi (1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-2t} \cdot e^{-\lambda t} \\ &= M \cdot \sigma_c \cdot \Phi (1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2} \frac{(1 - e^{-\lambda t_3})}{\lambda t_3} \end{aligned} \quad [3.6]$$

Επειδή ισχύει:

$$M = \frac{N_A \cdot m}{W} \quad [3.7]$$

Όπου:

$N_A = 6.026 \times 10^{23}$ άτομα/mole, ο αριθμός Avogadro
 m = μάζα του υλικού σε (g)
 W = ατομικό βάρος του στοιχείου του υλικού

Τότε η σχέση [3.6] γίνεται

$$I_3 = \frac{N_A \cdot m}{W} \sigma_c \cdot \Phi (1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2} \frac{(1 - e^{-\lambda t_3})}{\lambda t_3} \quad [3.8]$$

ή

$$m = \frac{I_3 \cdot W \cdot \lambda t_3}{N_A \cdot \sigma_c \cdot \Phi (1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2} (1 - e^{-\lambda t_3})} \text{ g} \quad [3.9]$$

Επειδή είναι:

$$\eta = \frac{A/t_3}{I_3} \quad [3.10]$$

Όπου:

A = ο ολικός αριθμός των καθαρών κρούσεων στο χρόνο απαρίθμησης t_3 και η η απόδοση του συστήματος απαρίθμησης.

Με αντικατάσταση του I_3 στην [3.9] θα είναι:

$$m = \frac{A \cdot W \cdot \lambda}{\eta \cdot N_A \cdot \sigma_c \cdot \Phi (1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2} (1 - e^{-\lambda t_3})} \text{ g} \quad [3.11]$$

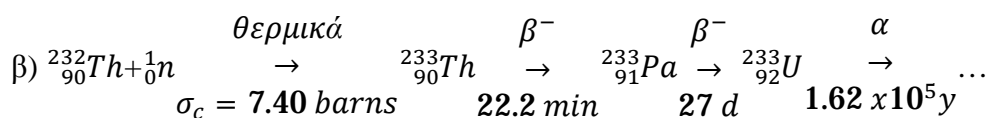
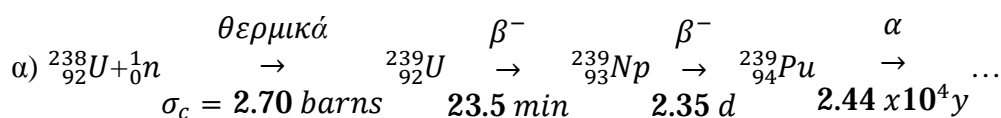
ή

$$m = 1.66 \cdot \frac{A \cdot W \cdot \lambda}{\eta \cdot N_A \cdot \sigma_c \cdot \Phi (1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2} (1 - e^{-\lambda t_3})} \text{ g} \quad [3.12]$$

Οπού:

σ_c θα εκφράζεται τώρα στη σχέση σε barns.

Σαν τυπικά παραδείγματα αναφέρουμε την ενεργοποίηση των ισοτόπων ουρανίου-238 και θορίου-232. Το σχήμα της (n,γ) αντίδρασης του ^{238}U και ^{232}Th και της αλυσίδας των ραδιενεργών διασπάσεων που ακολουθεί, έχει ως εξής:



Μ' ένα ανιχνευτή ακτινοβολίας γ π.χ. Ge-Li ή NaI(Tl) μπορούμε να μετρήσουμε την ενεργότητα I_3 (dps) ή τον ολικό αριθμό κρούσεων A στο χρόνο t_3 που οφείλεται στις γάμμα με ενέργεια 228 ή 278 keV του ^{239}Np (με χρόνο ημίσειας ζωής 2.35 d), για το ^{238}U ή 312 keV του ^{233}Pa (με χρόνο ημίσειας ζωής 27 d), για το ^{232}Th . Η απόδοση η του ανιχνευτή για τις συγκεκριμένες γάμμα είναι γνωστή από καμπύλες. Η ενεργός διατομή των θερμικών νετρονίων, σ_c , δίνεται από πίνακες για το κάθε ισότοπο στοιχείο που ενεργοποιείται, ενώ η ροή Φ των θερμικών νετρονίων ή είναι γνωστή σένα αντιδραστήρα από το σημείο που έγινε η ενεργοποίηση του υλικού ή προσδιορίζεται πειραματικά με φύλλα Au ή In.

Γενικά σε κάθε περίπτωση εκείνο που μετράει ο ανιχνευτής είναι η ενεργότητα του δείγματος:

$$R = \lambda \cdot M \quad [3.13]$$

Όπου:

M = ο αριθμός ραδιενεργών πυρήνων στο δείγμα, και
 λ = η σταθερά διάσπασης, sec^{-1} του ραδιενεργού.

Προκειμένου να προσδιοριστεί η συγκέντρωση (ή αλλιώς η μάζα) ενός ισοτόπου στοιχείου, C ή m , χρησιμοποιείται η σχέση [3.7]:

$$C = m = \frac{M}{N_A} \cdot Wg \quad [3.14]$$

ή

$$C = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{R}{N_A} \cdot Wg \quad [3.15]$$

3.2. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΟΥΡΑΝΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ «ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΜΕΝΩΝ» ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ

Η αρχή της μεθόδου έχει ως ακολούθως: Όταν ένα δείγμα που περιέχει ουράνιο βομβαρδιστεί με νετρόνια σ' ένα πυρηνικό αντιδραστήρα, λαβαίνει χώρα σχάση των πυρήνων του ουρανίου. Μερικά από τα νουκλίδια-προϊόντα της σχάσης εκπέμπουν καθυστερημένα νετρόνια σε έξι κυρίως ομάδες που χαρακτηρίζονται από το χρόνο ημίσειας ζωής τους, πίνακας 6. Τα καθυστερημένα νετρόνια που αποτελούν το 0.65% του συνόλου των νετρονίων σχάσης, ανιχνεύονται και μετρούνται με απαριθμητές BF_3 . Έτσι προσδιορίζεται η ολική ποσότητα του ουρανίου του δείγματος με σύγκριση δειγμάτων αναφοράς γνωστής περιεκτικότητας σε ουράνιο.

T(sec)	Ενέργεια MeV	Ποσοστό(%) εφόλων των νετρ. σχάσης
0.23	—	0.0273
0.61	0.14	0.0748
2.30	0.45	0.2568
6.22	0.41	0.1274
24.6	0.46	0.1424
55.7	0.25	0.0215
Σύνολο	1.98	0.65

Πίνακας 6: Καθυστερημένα νετρόνια της σχάσης του ^{235}U με θερμικά νετρόνια

Πρακτικά 1 g δείγματος, που είναι αρκετό για ανάλυση με τη μέθοδο αυτή, τοποθετείται σε φιαλίδιο από πολυαιθυλένιο που κλείνει ερμητικά. Στη συνέχεια στέλνεται για ακτινοβόληση στον αντιδραστήρα με πνευματικό σύστημα που μπορεί να μεταφέρει μεγάλο αριθμό δειγμάτων. Η ακτινοβόληση γίνεται σε μεγάλες ροές νετρονίων π.χ. $1 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ για 60 sec ή και περισσότερο. Μετά την ακτινοβόληση τα δείγματα «ψύχονται» για 10 sec επειδή είναι «θερμά» (πάρα πολύ ραδιενεργά) για να διασπασθούν τα βραχύβια ραδιονουκλίδια πολύ μεγάλης ενεργότητας και στη συνέχεια οδηγούνται στο σύστημα μέτρησης των καθυστερημένων νετρονίων που αποτελείται από έξι απαριθμητές $^{10}BF_3$, ένα για κάθε ομάδα, με επιβραδυντές από παραφίνη. Η μέτρηση διαρκεί περίπου 60 sec.

3.3. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΟΥΡΑΝΙΟΥ ΣΕ ΟΡΥΚΤΑ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΕΓΓΡΑΦΗΣ ΙΧΝΩΝ ΣΧΑΣΗΣ.

Η συγκέντρωση του ουρανίου σε ορυκτά με τη μέθοδο εγγραφής ιχνών σχάσης, προσδιορίζεται με τη σχέση:

$$C = \frac{2M\rho i}{\sigma \cdot I \cdot N \cdot d \cdot R_0 \cdot \Phi} \text{ g/g} \quad [3.16]$$

Όπου:

$M=238$, το ατομικό βάρος του ^{238}U .

$N=6.023 \times 10^{23}$ άτομα/mole, αριθμός Avogadro.

$\sigma=580 \text{ barns}=580 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$, η ενεργός διατομή σχάσης του ισότοπου ^{235}U με θερμικά νετρόνια.

$I=7.25 \times 10^{-3}$, η ισοτοπική αναλογία για το ^{235}U ($^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$).

d =η μέση πυκνότητα του υλικού, σε $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

R_0 =η μέση εμβέλεια των θραυσμάτων σχάσης του ^{235}U , σε μm (π.χ. στο επίδοτο είναι $R_0=10.9 \mu\text{m}$), τα ρ_i και Φ .

Με αντικατάσταση των τιμών ορισμένων φυσικών μεγεθών για το ουράνιο, η σχέση [3.16] γίνεται:

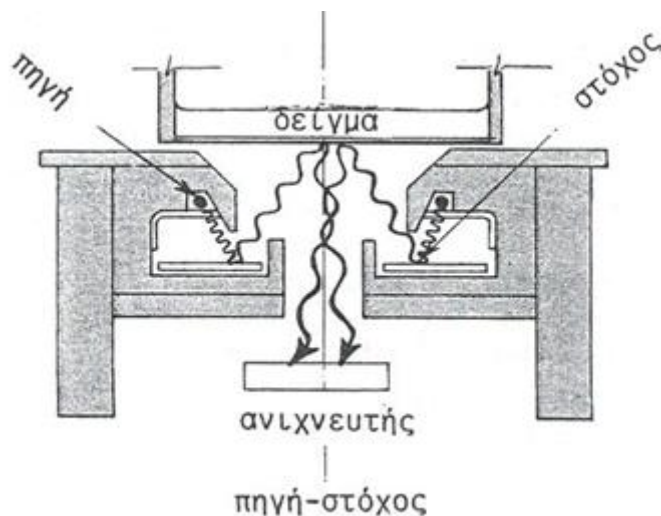
$$C=1.88 \times 10^{-6} \frac{\rho_i}{d \cdot R_0 \cdot \Phi} \text{ g/g} \quad [3.17]$$

Η παραπάνω μέθοδος εφαρμόζεται σε υλικά που είναι αδύνατο να γίνει η εγγραφή των ιχνών σχάσης, όπως είναι η φυσική ύαλος και φυσικά θα πρέπει να περιέχουν ουράνιο. Γίνεται ένας συνδυασμός των ιχνών της αυθόρμητης σχάσης των πυρήνων του ουρανίου -238 με σταθερά $\lambda_f=8.7 \times 10^{-17} \text{ y}^{-1}$, που έλαβαν χώρα από τη φυσική ακτινοβολία του ορυκτού λόγω σχάσης των σχάσιμων πυρήνων που περιέχονται σ' αυτό και των ιχνών ρ_i της επαγόμενης σχάσης σε ολοκληρωμένη ροή θερμικών νετρονίων, $\Phi \cdot \text{n}\cdot\text{cm}^{-2}$ που μπορεί να λάβει χώρα σ' ένα αντιδραστήρα.

3.4. ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ ΜΕ ΑΚΤΙΝΕΣ-X

Για την έρευνα-ανακάλυψη στοιχείων που δεν έχουν βρεθεί στη φύση με χημική μέθοδο λόγω της μικρής τους συγκέντρωσης (ιχνοστοιχεία), καθώς και για την ανίχνευση στοιχείων σ' ένα δείγμα χωρίς την οποιαδήποτε χημική επεξεργασία που πιθανόν να συνεπάγονταν την καταστροφή του δείγματος σε οποιοδήποτε βαθμό, εφαρμόζεται η μέθοδος ανάλυσης φθορισμού με ακτίνες X (X-Ray Fluorescence) ή PIXE ανάλυση (photon induced X-ray emission).

Κατά τη μέθοδο αυτή, ακτινοβολία γάμμα, π.χ. ενέργειας 60 keV του ^{241}Am , πέφτει πάνω στο υπό εξέταση δείγμα, Σχήμα 6 και κατάλληλος ανιχνευτής ακτίνων-X σε συνδυασμό με αναλυτή ύψους παλμών αναλύει το φάσμα φθορισμού.



Σχήμα 9: Διάταξη της μεθόδου ανάλυσης φθορισμού με ακτίνες-X

4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΡΑΔΙΟΧΡΟΝΟΛΟΓΗΣΕΙΣ

4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πριν την εφαρμογή των μεθόδων ραδιοχρονολόγησης, οι ηλικίες των πετρωμάτων βασίζονταν στη μελέτη του ρυθμού ιζηματογένεσης και εκγύμνασης γεωλογικών υλικών. Μετά την ανακάλυψη της ραδιενέργειας το 1896, το φαινόμενο της ραδιενεργού διάσπασης σύντομα βρήκε εφαρμογή σε πλείστα όσα γεωλογικά προβλήματα και από το 1902 και μετά μεγάλη πρόοδος σημειώθηκε στον τομέα αυτό. Περισσότερο ακριβείς μέθοδοι, φυσικές και χημικές, ήταν απαραίτητοι, όπως ήταν φανερό, για την καλύτερη εκτίμηση από τις ραδιενεργές μετρήσεις. Και αυτό έγινε σένα βαθμό μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο με την ανάπτυξη και εξέλιξη της ατομικής ενέργειας που είχε σχέση με τον τομέα αυτό.

Το πρόβλημα της ηλικίας του σύμπαντος είχε απασχολήσει τον άνθρωπο από τους προϊστορικούς χρόνους. Ο Ξενοφάνης ο Κολοφώνιος (570-480 π.Χ.) ήταν (πιθανώς), ίσως, ο πρώτος που παραδέχτηκε ότι μεταβολές της πανίδας των απολιθωμάτων μπορούσαν να αφήσουν ίχνη (ενδείξεις, μαρτυρίες) γεωλογικών μεταβολών. Ο Έλληνας ιστορικός Ηρόδοτος (484-424 π.Χ.) αναφέρει ότι τα συμπαγή ιζήματα των αποθέσεων του ποταμού Νείλου ήταν ένα μέτρο εκτίμησης της διάρκειας προϊστορικών χρόνων. Κι ενώ οι επιστήμονες έβαζαν τον εαυτό τους σε σκέψεις για την εκτίμηση της γεωλογικής ηλικίας, υπολογισμοί με βάση θρησκευτικές θεωρίες στην εύρεση της πραγματικής ηλικίας δεν είχαν κανένα επιστημονικό έρεισμα. Η βίβλος αναφέρει ότι η γη είναι 6.000 ετών, αλλά ο τρόπος εκτίμησης αυτής της ηλικίας ήταν ασαφής. Σύμφωνα με την Εβραϊκή θρησκεία η χρονολογία αυτή ανάγεται στο 3700 π.Χ. ενώ σύμφωνα με την Ρωμαιοκαθολική εκκλησία στο 5199 π.Χ. Σύμφωνα με Haber, (1959) άλλοι υπολογισμοί σύμφωνα με φιλοσοφικές προσεγγιστικές θεωρίες διαφόρων Ινδικών θρησκευτικών δογμάτων και την μελέτη «κύκλων κοσμικής προέλευσης» τοποθετούν την ηλικία σε 4.320.000 έτη.

Η γεωλογική μέθοδος αξιοποιήθηκε ποσοτικά τον περασμένο αιώνα και παρόλο που υπήρχαν διαφορετικές απόψεις, η ηλικία της γης υπολογιζόταν μεταξύ 100 και 600 My (εκατομμύρια χρόνια). Η φυσική, σε διαφωνία, έδινε τιμές μικρότερες από 100 My και σαν πιο πιθανή ηλικία, 25 My. Βάση αυτών των τιμών αποτέλεσαν οι υπολογισμοί του Kelvin για τον χρόνο που χρειάζεται μια σφαίρα, όπως η Γη, να φθάσει στη θερμοκρασία που έχει, αν λάβει κανείς υπόψη την αγωγιμότητα της και την απώλεια θερμότητας υπό μορφήν ακτινοβολίας από την επιφάνεια της. Μια αρχική θερμοκρασία πρέπει να υποτεθεί, για τους υπολογισμούς, αλλά δεν είναι κρίσιμη η τιμή αυτή γιατί αρχικά η ψύξη γίνεται με πολύ ταχύ ρυθμό.

Τα πρώτα χρόνια ήταν τότε άγνωστο το ότι η Γη διαθέτει εσωτερική πηγή ενέργειας και αυτό έγινε γνωστό με την ανακάλυψη της ραδιενέργειας, των φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων, κ.λπ. Η ενέργεια που ελευθερώνεται κατά την διάσπαση των ραδιενεργών στοιχείων θεωρείται σήμερα σαν πολύ σημαντικός παράγοντας για την ενεργειακή κατάσταση της Γης, με ενέργειες της τάξης της $\mu\text{cal/g}\cdot\text{y}$ να προέρχονται από τις φυσικές ραδιενεργές σειρές. Μια άλλη πηγή που έχει αναγνωρισθεί είναι η αντίδραση μεταξύ ηλιακών νετρονίων και της Γης, χωρίς όμως να είναι γνωστός με ακρίβεια, ένεκα των αβεβαιοτήτων, ο ρυθμός απορρόφησης της ενέργειας, στη ροή των νετρονίων και την ενεργό διατομή για αντιδράσεις με την ύλη.

Η ραδιενέργεια δείχτηκε θετικός παράγοντας στο πρόβλημα. Αμέσως μετά την ανακάλυψη της, αναγνωρίστηκε σαν ένα φυσικό χρονόμετρο και οι πολλαπλές εφαρμογές της στη χρονολόγηση (ραδιοχρονολόγηση) της έδωσαν την πρώτη θέση στον κατάλογο των μεθόδων που χρησιμοποιούνται σήμερα για τον σκοπό αυτό.

Πρώτος ο Rutherford έκανε την εισήγηση ότι, επειδή στις διασπάσεις των ραδιενεργών σειρών εκπέμπονται σωματίδια άλφα, η περιεκτικότητα ενός δείγματος σε He θα είναι συνάρτηση της ηλικίας του. Ο λόγος είναι ότι, τα σωματίδια άλφα με τις μικρές τους εμβέλεις θα σταματήσουν μέσα στο δείγμα και θα γίνουν ουδέτερα άτομα ηλίου με την απόκτηση ηλεκτρονίων από τα γειτονικά άτομα. Αν το δείγμα είναι στερεό για να αποφευχθεί η διάχυση και η διαφυγή του ηλίου, τότε η περιεκτικότητα του δείγματος σε ήλιο θα αυξάνει με ρυθμό ανάλογο του ρυθμού διάσπασης των ραδιενεργών. Από αυτό το φαινόμενο είναι δυνατό να βρεθεί ο χρόνος από την στερεοποίηση του δείγματος.

Αμέσως μετά χρησιμοποιήθηκε το γεγονός ότι τα τελικά προϊόντα των τριών φυσικών ραδιενεργών σειρών (^{238}U , ^{235}U και ^{232}Th) είναι ισότοπα του μολύβδου, (διαφορετικά για την κάθε σειρά) και επομένως η περιεκτικότητα του δείγματος σε μολύβδο είναι πάλι συνάρτηση της ηλικίας του.

Εκτός των ανωτέρω και άλλα ραδιοϊσότοπα χρησιμοποιήθηκαν επίσης για ραδιοχρονολόγηση και σήμερα η ηλικία της Γης υπολογίζεται σε χιλιάδες εκατομμύρια χρόνια. Επίσης χρησιμοποιούνται σήμερα, για ραδιοχρονολόγηση στην αρχαιολογία κυρίως, και βραχύβια ραδιοϊσότοπα όπως ο ^{14}C και το ^3H των οποίων η προέλευση δεν είναι κοσμογονική, αλλά οφείλεται στην διαρκή παραγωγή τους στην ατμόσφαιρα από τις κοσμικές ακτινοβολίες.

Η ραδιοχρονολόγηση εφαρμόζεται όχι μόνο σε γήινα πετρώματα αλλά και σε μετεωρίτες και τελευταίως, σε σεληνιακά πετρώματα. Έτσι, το πεδίο εφαρμογής της ραδιοχρονολόγησης έχει αρχίσει να καλύπτει το ηλικιακό σύστημα και να δίνει αποτελέσματα που επηρεάζουν τις διάφορες θεωρίες σχετικά με τη γένεση των πλανητών.

4.2. ΗΛΙΚΙΑ ΤΗΣ ΥΛΗΣ

Από την ύπαρξη ή μη ορισμένων ραδιοϊσοτόπων στη φύση, μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα σχετικά με την ηλικία της ύλης.

Το ^{244}Pu για παράδειγμα, με $T_{1/2}=8.1 \times 10^7\text{y}$ δεν υπάρχει στη φύση. Ας δεχθούμε ότι μια περίοδος ίση με $10T_{1/2}$ που θα μειώσει τη συγκέντρωση ενός ραδιοϊσοτόπου κατά ένα παράγοντα $2^{10}\approx 1000$, είναι το ελάχιστο χρονικό διάστημα που χρειάζεται για να μειώσει τη συγκέντρωση του ραδιοϊσοτόπου σε μη μετρήσιμη τιμή. Τότε για να έχει εξαλειφθεί το ^{244}Pu θα πρέπει να έχει περάσει, από τότε που δημιουργήθηκε, χρόνος της τάξης των $10 \cdot 8.1 \times 10^7\text{y}$, δηλαδή $\approx 10^9\text{y}$. Η ηλικία τη ύλης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από περίπου 10^9y , δηλαδή 10 περίπου ημιζωές του ^{244}Pu .

Η περίπτωση του ^{40}K ενισχύει αυτόν τον συλλογισμό. Το ^{40}K με $T_{1/2}=1.28 \times 10^9\text{y}$ βρίσκεται μεν στη φύση, αλλά σε πολύ μικρή συγκέντρωση, ήτοι 0.0117% του ολκού K. Σύμφωνα με τις σημερινές θεωρίες για τη γένεση της ύλης (bigbang, κ.λπ.) τα διάφορα ισότοπα των στοιχείων θα πρέπει να είχαν δημιουργηθεί σε ίσες περίπου αναλογίες. Η μείωση της περιεκτικότητας του καλίου σε ^{40}K φανερώνει ότι η ηλικία της ύλης θα πρέπει να είναι μερικές φορές το 10^9y . Είναι ενδιαφέρον το γεγονός ότι αν υπολογίσει κανείς τον χρόνο που απαιτείται για να μειωθεί η αναλογία $^{40}\text{K}/^{39}\text{K}$ από την αρχική της τιμή, της μονάδας, στη σημερινή τιμή $\approx 10^{-4}$, βρίσκει μια ηλικία περίπου 10^{10}y για την ύλη ($1.67 \times 10^{10}\text{y}$), που είναι της τάξης μεγέθους της ηλικίας του σύμπαντος όπως βρίσκεται σήμερα από αστρονομικές παρατηρήσεις ($1.7 \times 10^{10}\text{y}$).

Στο άλλο άκρο, ραδιοϊσότοπα με $T_{1/2}$ της τάξης των 10^9 y βρίσκονται ακόμη και σήμερα στη φύση. Για παράδειγμα το ^{235}U με $T_{1/2} = 7.038 \times 10^8 \approx 10^9$ y αποτελεί το 0.72% του φυσικού ουρανίου που συνίσταται κυρίως από ^{238}U (99.275%). Αυτό σημαίνει ότι η ηλικία της ύλης δεν μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερη από $10 \times 10^9 = 10^{10}$ y γιατί τότε και το ^{235}U θα είχε παντελώς εκλείψει.

Από την κοσμολογία, με μετρήσεις της σταθεράς του Hubble στα φάσματα μακρινών γαλαξιών από τη μετατόπιση προς το ερυθρό (redshift) δεχόμενοι ότι η μετατόπιση αυτή οφείλεται στο φαινόμενο Doppler και την κίνηση των γαλαξιών, υπολογίζεται ότι η ηλικία του σύμπαντος είναι 1.7×10^{10} y. Η ηλικία αυτή πιθανότατα θα αλλάξει προς μεγαλύτερες τιμές σαν αποτέλεσμα νέων μετρήσεων που θα γίνουν, στο μέλλον όπως έχει συμβεί αρκετές φορές στις τελευταίες δεκαετίες.

4.3. ΓΕΝΙΚΗ ΑΡΧΗ ΤΩΝ ΡΑΔΙΟΧΡΟΝΟΛΟΓΗΣΕΩΝ

Η γενική φιλοσοφία της ραδιοχρονολόγησης είναι η ακόλουθη: Έστω ότι κατά τη χρονική στιγμή t της μελέτης το μητρικό ισότοπο είναι σε συγκέντρωση M πυρήνων και το θυγατρικό είναι σε συγκέντρωση Θ πυρήνων. Έστω λ ($\lambda = \frac{0.693}{T}$) η σταθερά διάσπασης του M . Θεωρούμε την περίπτωση που το θυγατρικό Θ δεν είναι ραδιενεργό και δεν υπάρχει στην αρχή των χρόνων $t=0$. Με εφαρμογή του βασικού νόμου των ραδιενεργών διασπάσεων θα έχουμε για τον ρυθμό σχηματισμού (ρυθμό παραγωγής) των θυγατρικών πυρήνων:

$$\frac{d\theta}{dt} = \lambda \cdot M \quad [4.1]$$

Όπου:

$$M = M_0 e^{-\lambda t}$$

M_0 = ο αρχικός (για $t=0$) αριθμός πυρήνων του μητρικού.

Η [4.1] συνεπώς γίνεται:

$$d\theta = \lambda \cdot M \cdot dt = \lambda M_0 e^{-\lambda t} dt \quad [4.2]$$

Με ολοκλήρωση των μελών της σχέσης [4.2] έχουμε:

$$\int_0^\theta d\theta = \lambda M_0 \int_0^t e^{-\lambda t} dt \quad [4.3]$$

ή

$$\Theta = M_0 (1 - e^{-\lambda t}) \quad [4.4]$$

Υποθέσαμε ότι $\theta_0=0$, στην αρχή των χρόνων δεν υπήρχαν θυγατρικοί πυρήνες. Με αντικατάσταση του $M_0 = \frac{M}{e^{-\lambda t}} = M e^{\lambda t}$ στη σχέση [4.4], έχουμε:

$$\Theta = M (e^{\lambda t} - 1) \quad [4.5]$$

$$\frac{\theta}{M} = e^{\lambda t} - 1 \quad [4.6]$$

Επιλύοντας τη σχέση [4.6] ως προς t θα έχουμε:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{\theta}{M} + 1 \right) \quad [4.7]$$

ή

$$t = \frac{T}{0.693} \ln \left(\frac{\theta}{M} + 1 \right) \quad [4.8]$$

Η σχέση [4.8] δίνει την ηλικία του δείγματος και είναι ο βασικός τύπος για τις ραδιοχρονολογήσεις. Η φυσική σημασία της σχέσης [4.6] άρα και της σχέσης [4.8], αναπτύσσοντας το $e^{\lambda t}$ σε σειρά και παίρνοντας τους δύο πρώτους όρους του αναπτύγματος, επειδή το λ είναι πολύ μικρό, (περίπτωση μακρόβιων ραδιενεργών), θα έχουμε:

$$e^{\lambda t} = 1 + \lambda t + \frac{\lambda^2 t^2}{2} + \dots \approx 1 + \lambda t \quad [4.9]$$

Οπότε:

$$\frac{\theta}{M} = \lambda t \quad [4.10]$$

Συνεπώς η ηλικία του δείγματος από τη σχέση:

$$T = \frac{\theta}{\lambda M} = \frac{\theta}{\frac{dM}{dt}} \quad [4.11]$$

Είναι το πηλίκο της συγκέντρωσης του θυγατρικού (αριθμός πυρήνων) δια της ενεργότητας του μητρικού (διασπάσεις στη μονάδα του χρόνου). Εάν είναι γνωστή η μάζα του θυγατρικού, m_θ σε γραμμάρια, τότε η σχέση [4.11] γίνεται:

$$T = 1.91 \times 10^{16} \frac{m_\theta}{\frac{dM}{dt}} \text{ έτη} \quad [4.12]$$

Όπου:

W = το ατομικό βάρος του θυγατρικού
 dM/dt = η ενεργότητα του μητρικού σε dps.

Η ενεργότητα dM/dt του μητρικού προσδιορίζεται με ανιχνευτή πυρηνικών ακτινοβολιών, ενώ η συγκέντρωση του θυγατρικού ισοτόπου προσδιορίζεται με φασματογράφο μάζας (φασματομετρικός) ή με ενεργοποίηση με νετρόνια.

Σύμφωνα με την [4.8] οποιοδήποτε ραδιενεργό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη ραδιοχρονολόγηση αρκεί το T σε σύγκριση με το t που θα πρέπει να προσδιοριστεί, να μην είναι τόσο μεγάλο, έτσι ώστε το θ να είναι μετρήσιμο. Πάλι, από την άλλη πλευρά, η απλή διερεύνηση δείχνει (για νάνε μετρήσιμο το M) ότι θα μπορούσαν το πολύ να προσδιοριστούν (εκτιμηθούν) χρόνοι μέχρι, ας πούμε, 10 ημιζωές του μητρικού.

Η εφαρμογή της μεθόδου γίνεται εάν πληρούνται οι εξής δύο συνθήκες:

- Το δείγμα δεν πρέπει να περιέχει στον χρόνο μηδέν καθόλου από το θυγατρικό.
- Δεν θα πρέπει να διαφύγει από το δείγμα για οποιοδήποτε λόγο, από τον χρόνο μηδέν και μετά, καμία ποσότητα ούτε του θυγατρικού ούτε του μητρικού.

4.4. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΤΩΝ ΡΑΔΙΟΧΡΟΝΟΛΟΓΗΣΕΩΝ

Οι μέθοδοι των ραδιοχρονολογήσεων μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες:

- Μέθοδοι ζευγών. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι ακόλουθοι μέθοδοι: Μέθοδος ουρανίου-ηλίου ή απλά μέθοδος ηλίου, μέθοδος ουρανίου-μολύβδου ή θορίου-μολύβδου ή απλά μέθοδος μολύβδου, μέθοδος καλίου-αργού, μέθοδος ρουβιδίου-στροντίου, μέθοδος ρενίου-οσμίου, μέθοδος λουτετίου-χαφνίου.
- Μέθοδος μεμονωμένων ισοτόπων. Σ' αυτήν ανήκουν η μέθοδος άνθρακα-14 και η μέθοδος τριτίου.
- Φυσικές μέθοδοι που δεν στηρίζονται καθαυτές στο φαινόμενο της ραδιενεργού διάσπασης, όπως είναι η μέθοδος εγγραφής ιχνών σχάσης (FID=fiss iontrack dating), η μέθοδος της θερμοφωταύγειας (TL dating=thermo-luminescence dating) και η μέθοδος συντονισμού του σπιν του ηλεκτρονίου (ESR dating=electron spin resonance).

4.5. ΜΕΘΟΔΟΣ ΗΛΙΟΥ

Στις φυσικές ραδιενεργές σειρές $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$, $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$ και $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$ λαβαίνουν κατά σειρά 8,6 και 7 άλφα διασπάσεις αντίστοιχα. Εάν M_0 η αρχική συγκέντρωση του μητρικού μιας σειράς και $M=M_0 e^{-\lambda t}$, η συγκέντρωση του στον χρόνο t , ηλικία του δείγματος, τότε ο αριθμός των διασπασθέντων πυρήνων του μητρικού στον χρόνο t θα είναι:

$$dM = M_0 - M = M_0 - M_0 e^{-\lambda t} = M_0 (1 - e^{-\lambda t}) \quad [4.13]$$

ή λόγω της $M = M_0 e^{-\lambda t}$, θα είναι:

$$dM = M(e^{\lambda t} - 1) \quad [4.14]$$

Συνεπώς ο αριθμός των σχηματισθέντων πυρήνων ^4He από τα σωματία άλφα (που είναι ως γνωστόν γυμνοί πυρήνες ηλίου) που προέκυψαν από τις άλφα διασπάσεις των ανωτέρω σειρών, θα είναι αντίστοιχα.

$$\begin{aligned} {}^4_2\text{He}_1 &= 8^{238}\text{U}_t \cdot (e^{\lambda_1 t} - 1) \\ {}^4_2\text{He}_2 &= 6^{232}\text{Th}_t \cdot (e^{\lambda_2 t} - 1) \\ {}^4_2\text{He}_3 &= 7^{235}\text{U}_t \cdot (e^{\lambda_3 t} - 1) \end{aligned} \quad [4.15]$$

Όπου:

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ οι σταθ. Διάσπασης των ^{238}U , ^{232}Th και ^{235}U , αντίστοιχα.

Εάν $R_1 = \lambda_1 \cdot ^{238}\text{U}_t$, $R_2 = \lambda_2 \cdot ^{232}\text{Th}_t$ και $R_3 = \lambda_3 \cdot ^{235}\text{U}_t$ οι ενεργότητες των τριών φυσικών ισοτόπων στον χρόνο t , τότε οι σχέσεις [4.15] γίνονται:

$$\begin{aligned}
{}^4_2He_1 &= \frac{8R_1}{\lambda_1} \cdot (e^{\lambda_1 t} - 1) \\
{}^4_2He_2 &= \frac{6R_2}{\lambda_2} \cdot (e^{\lambda_2 t} - 1) \\
{}^4_2He_3 &= \frac{7R_3}{\lambda_3} \cdot (e^{\lambda_3 t} - 1)
\end{aligned}
\tag{4.16}$$

Το 4_2He προσδιορίζεται φασματομετρικώς και οι ενεργότητες των φυσικών νουκλιδίων με ανιχνευτές πυρηνικών ακτινοβολιών. Έτσι προσδιορίζεται η ηλικία του δείγματος t που περιέχει ένα, δύο ή και τα τρία φυσικά αυτά ραδιενεργά. Η μέθοδος θα μπορούσε να εφαρμοσθεί σένα δείγμα με τις εξής προϋποθέσεις:

- Έντονη, σχετικά με την ηλικία, απόθεση του φυσικού νουκλιδίου (του ουρανίου και θορίου στην περίπτωση αυτή)
- Παραμονή του ηλίου των διασπάσεων μέσα στο δείγμα σε όλη την μακροχρόνια αυτή περίοδο, δηλαδή την ηλικία. Ακριβώς στην τελευταία υπόθεση βρίσκεται η όλη δυσκολία. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται αρκετά καλά για τον προσδιορισμό ηλικίας πυριγενών πετρωμάτων ή μετεωριτών, καθόσον αυτά είναι συμπαγή και το ήλιο δεν διαχέεται και συνεπώς δεν διαφεύγει.

4.6. ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΟΛΥΒΔΟΥ

Οι πρώτες εκτιμήσεις με τη μέθοδο μολύβδου, ή αλλιώς ηλικίες μολύβδου, βασίστηκαν πάνω στον χημικό προσδιορισμό του λόγου μολύβδου-ουρανίου στα ορυκτά που είχαν ουράνιο και του λόγου μολύβδου-θορίου στα ορυκτά που είχαν θόριο. Με τη φασματοσκοπία μάζας όμως η χημική μέθοδος έχει σχεδόν καταργηθεί. Εκείνο που προσδιορίζεται στην κάθε περίπτωση είναι ο λόγος του θυγατρικού-μητρικού στοιχείου. Ανάλογα με το ορυκτό και με βάση τη σχέση [4.6] προσδιορίζονται οι λόγοι

$$\frac{{}^{206}Pb}{{}^{238}U} = e^{\lambda t} - 1 = e^{1.55 \times 10^{-10}t} - 1
\tag{4.17}$$

$$\frac{{}^{207}Pb}{{}^{235}U} = e^{9.85 \times 10^{-10}t} - 1
\tag{4.18}$$

$$\frac{{}^{208}Pb}{{}^{232}Th} = e^{0.49 \times 10^{-10}t} - 1
\tag{4.19}$$

Όπου:

t = δίνεται σε έτη και:

$$\lambda_{238U} = \frac{0.693}{T_{238U}} = \frac{0.693}{4.468 \times 10^9 y} = 1.55 \times 10^{-10} y^{-1}$$

$$\lambda_{235U} = \frac{0.693}{7.038 \times 10^8 y} = 9.85 \times 10^{-10} y^{-1}$$

$$\lambda_{232Th} = \frac{0.693}{1.41 \times 10^{10} y} = 0.49 \times 10^{-10} y^{-1}$$

Μια πιο απλή, αλλά και με πιο μεγάλη ακρίβεια μέθοδος προσδιορισμού της ηλικίας t για την περίπτωση του μολύβδου, είναι να προσδιοριστεί ο λόγος ${}^{207}Pb/{}^{206}Pb$ και να χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$$\frac{207_{Pb}}{206_{Pb}} = \frac{235_U}{238_U} \cdot \frac{e^{9.85 \times 10^{-10}t-1}}{e^{1.55 \times 10^{-10}t-1}} \quad [4.20]$$

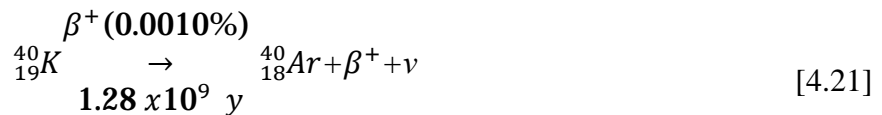
Στη μέθοδο μολύβδου υπάρχει το εξής πρόβλημα, ότι μέρος του μολύβδου που έχει το δείγμα είναι δυνατό να μην είναι ραδιογενετικό. Μια κάποια λύση πάνω σ' αυτό είναι η εξής: Ο φυσικός (κοσμογενετικός) μολύβδος έχει και το ισότοπο 204_{Pb} σε συγκέντρωση 1.42% και ο οποίος δεν είναι καμίας φυσικής ραδιενεργού σειράς το τελικό προϊόν. Υπάρχουν δύο λύσεις. Η μία είναι να χρησιμοποιηθούν δείγματα που δεν περιέχουν Pb-204. Η άλλη είναι να προσδιοριστούν οι λόγοι $204_{Pb}/206_{Pb}$ και $204_{Pb}/207_{Pb}$. Γνωρίζοντας λοιπόν την ισοτοπική κοσμογενετική σύσταση του μολύβδου μπορούν να γίνουν οι κατάλληλες διορθώσεις. Η αναλογία των σταθερών ισωτόπων του μολύβδου στη φύση έχει ως εξής: 204_{Pb} :1.4%, 206_{Pb} : 24.1%, 207_{Pb} :22.1% και 208_{Pb} :52.3%.

Το παλαιότερο ορυκτό που προσδιορίστηκε με τη μέθοδο ουρανίου-μολύβδου είχε ηλικία 4.6×10^9 y.

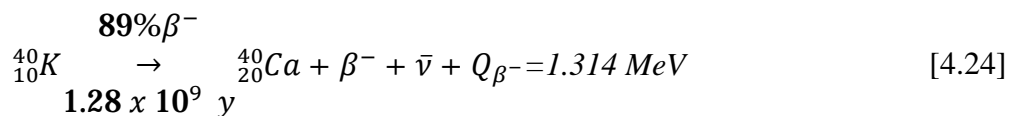
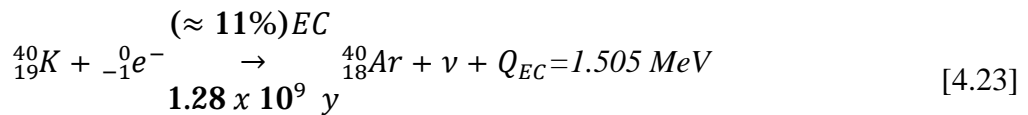
4.7. ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΛΙΟΥ-ΑΡΓΟΥ

Το φυσικό κάλιο περιέχει τα σταθερά ισότοπα 39_K (93.26%) και 41_K (6.73%) και σε ποσοστό περίπου 0.0117% το ραδιενεργό ισότοπο 40_K . Παρατηρούμε δηλαδή ότι υπάρχουν δύο κλάδοι διάσπασης. Ο κλάδος με β^- δίνει το 40_{Ca} ενώ ο κλάδος με την EC (αρπάγη ηλεκτρονίου) δίνει το 40_{Ar^*} , σε διεγερμένη κατάσταση. Το 40_{Ar^*} μεταπίπτει πάραυτα στη βασική του κατάσταση δίνοντας τη χαρακτηριστική του ακτινοβολία γάμμα των 1.460 MeV. Το ποσοστό του κλάδου EC είναι $\approx 11\%$ ο δε χρόνος υποδιπλασιασμού του 40_K είναι 1.28×10^9 y.

Αναλυτικότερα οι αντιδράσεις διάσπασης του 40_K έχουν ως ακολούθως:



$$E_{\beta^+} = 0.483 \text{ MeV (max)} \quad [4.22]$$



Ο γενικός τύπος που δίνει την ηλικία t του δείγματος με τη μέθοδο του K-Ar είναι, με βάση τη σχέση [4.6]:

$$\frac{{}^{40}_{Ar}}{{}^{40}_{K}} = 0.11 \{ e^{5.4 \times 10^{-10}t} - 1 \} \quad [4.25]$$

Και

$$t = 1.847 \times 10^9 \ln \left(9.09 \frac{^{40}\text{Ar}}{^{40}\text{K}} + 1 \right) \quad [4.26]$$

Ο συντελεστής 0.11 δηλώνει το ποσοστό του κλάδου της αρπάγης ηλεκτρονίου που παράγει το ^{40}Ar . Η μέθοδος του K-Ar είναι ασφαλέστερη της μεθόδου Ηλίου και των μεθόδων μολύβδου και Rb-Sr. Στις δυο τελευταίες μεθόδους θα πρέπει να γίνει η υπόθεση ότι ο Pb και το Sr στα αντίστοιχα δείγματα είχαν καθαρά ραδιογενετική προέλευση ενώ η μέθοδος ηλίου, όπως αναφέρεται, υποφέρει απ' το γεγονός ότι το He θα διαχέεται μέσω των δειγμάτων, ιδιαίτερα όταν το πορώδες είναι έντονο. Το Ar στην περίπτωση πετρωμάτων, όντας αέριο, δεν μπορεί να έχει κοσμογενετική προέλευση γιατί θα διέφευγε πριν στερεοποιηθεί το πέτρωμα. Επειδή δε το ατομικό βάρος του Ar είναι 10 φορές μεγαλύτερο του He η διάχυση θα είναι κατά πολύ μικρότερη. Η αναλογία των σταθερών ισοτόπων του αργού στη φύση έχει ως εξής: ^{36}Ar : 0.337%, ^{38}Ar : 0.063%, ^{40}Ar : 99.60%.

Ο αστερίσκος εδώ σημαίνει την διεγερμένη κατάσταση του ^{40}Ar .

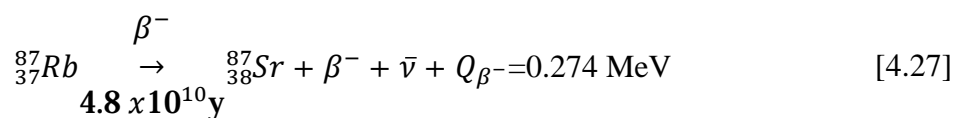
Η ραδιοχρονολόγηση γίνεται απευθείας προσδιορισμός του ^{40}Ar με φασματογράφο μάζας ή εφαρμόζεται η μέθοδος της ενεργοποίησης με νετρόνια αντίδραση $^{40}\text{Ar}(n,\gamma) ^{41}\text{Ar}$. Το ^{41}Ar είναι β^- ραδιενεργό με χρόνο ημίσειας ζωής 1.83h. Έχει μια γάμμα 1.293 MeV (99%). Συνεπώς μπορεί να προσδιοριστεί με τη γάμμα φασματοσκοπία, απαριθμητές Ge-Li και απαριθμητές σπινθηρισμών NaI (TI). Το ^{40}K προσδιορίζεται με τη γάμμα φασματοσκοπία μέσω των γάμμα με ενέργεια 1.460 MeV (11%) που προαναφέρθηκε.

Η μέθοδος δίνει καλά αποτελέσματα για ραδιοχρονολόγηση πυριγενών πετρωμάτων π.χ. mica, που είναι πλούσια σε κάλιο. Έχει εφαρμοστεί πολλαπλώς. Εν πάροδο, ας αναφερθεί ότι έχει χρησιμοποιηθεί και για χρονολόγηση μετεωριτών-χονδριτών κ.λπ. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι τηκτικές που περιέχουν φυσαλίδες. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις με αέρια άλλων στοιχείων μη ραδιογενετικής προέλευσης. Τα αέρια που βρίσκονται σε πλούσια σε φυσαλίδες δείγματα τηκτικών είναι ίδια με εκείνα της ατμόσφαιρας που περιβάλλει τη γη.

Η περιεκτικότητα σε K, στην ουσία του ^{39}K , είναι της τάξης του 1 έως 3%, του δε ^{40}Ar της τάξης του 5×10^{-8} έως $280 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$. Οι ηλικίες υπολογίζονται από περίπου 0.7 My έως 35 My.

4.8. ΜΕΘΟΔΟΣ ΡΟΥΒΙΔΙΟΥ-ΣΤΡΟΝΤΙΟΥ

Το φυσικό ρουβίδιο έχει δυο ισότοπα. Το ^{85}Rb (72.17%) σταθερό και το ^{87}Rb (27.83%) ραδιενεργό. Το ^{87}Rb μεταστοιχειούται με β^- διάσπαση στο ^{87}Sr :



Δεν εκπέμπει γάμμα. Η E_{max} των β^- του ^{87}Rb είναι 274 KeV και ο T είναι $4.8 \times 10^{10} \text{ y}$. Χρησιμοποιείται και εδώ για τον υπολογισμό της ηλικίας t του δείγματος η ανάλογη γενική έκφραση της σχέσης [4.6]:

$$\frac{^{87}\text{Sr}}{^{87}\text{Rb}} = e^{\lambda t} - 1 = e^{0.14 \times 10^{-10} t} - 1 \quad [4.28]$$

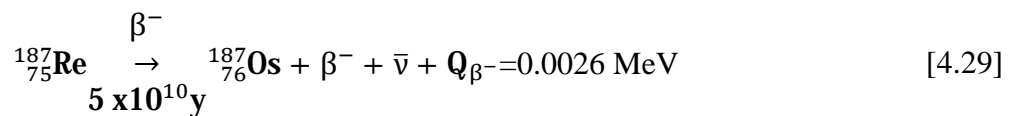
Στην πράξη προσδιορίζεται φασματοσκοπικά (οπτικός) ο λόγος του ολικού στροντίου προς το ολικό ρουβίδιο και με φασματογράφο μάζας προσδιορίζεται η ισοτοπική σύσταση

των μη ραδιενεργών και μη από ραδιογένεση ισοτόπων. Τα σταθερά ισότοπα του Sr στη φύση: $^{84}_{Sr}$: 0.56%, $^{86}_{Sr}$: 9.8%, $^{87}_{Sr}$: 7.0%, (λίαν μακρόβιο ραδιενεργό, πρακτικά σταθερό), $^{88}_{Sr}$: 82.6%.

Λόγω της σχετικά μικρής ενέργειας των β^- του $^{87}_{Rb}$, η ενεργότητα του $^{87}_{Rb}$ και συνεπώς και η συγκέντρωση (αριθμός των πυρήνων) του $^{87}_{Rb}$ της σχέσης [4.27] προσδιορίζεται με απαριθμητή β χαμηλού υποστρώματος, βλέπε παράγραφο 7.11^α. Η συγκέντρωση του ρουβιδίου στον φλοιό της Γης είναι $\approx 90 \text{ppm}$.

4.9. ΜΕΘΟΔΟΣ ΡΕΝΙΟΥ-ΟΣΜΙΟΥ

Το φυσικό ρένιο έχει δυο ισότοπα: το $^{185}_{Re}$ (37.4%) σταθερό και το $^{187}_{Re}$ (62.6%) ραδιενεργό. Το $^{187}_{Re}$ μεταστοιχειώνεται με β^- διάσπαση στο $^{187}_{Os}$.



Δεν εκπέμπονται ακτίνες γάμμα. Η E_{max} των β^- του $^{187}_{Re}$ είναι $\approx 3 \text{ keV}$ και ο χρόνος ημίσειας ζωής T είναι $5 \times 10^{10} \text{ y}$. Για τον υπολογισμό της ηλικίας t του δείγματος η ανάλογη γενική έκφραση της σχέσης [4.6] είναι:

$$\frac{^{187}_{Os}}{^{187}_{Re}} = e^{\lambda t} - 1 = e^{1.39 \times 10^{-11} t} - 1 \quad [4.30]$$

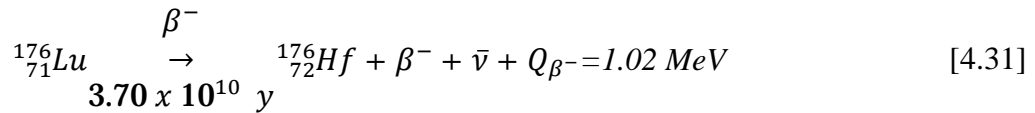
Ο λόγος του ολικού οσμίου προς το ολικό ρένιο υπολογίζεται φασματοσκοπικά, η δε ισοτοπική σύσταση των μη ραδιογενετικών νουκλιδίων με φασματογράφο μάζας. Τα σταθερά ισότοπα του οσμίου στη φύση είναι τα ακόλουθα: $^{184}_{Os}$ (0.02%), $^{186}_{Os}$ (1.58%), $^{187}_{Os}$ (1.6%), $^{188}_{Os}$ (13.3%), $^{189}_{Os}$ (16.1%), $^{190}_{Os}$ (26.4%) και $^{192}_{Os}$ (41.0%).

Το $^{187}_{Re}$ προσδιορίζεται με τη μέθοδο της ενεργοποίησης με θερμικά νετρόνια και όχι με τη μέθοδο της απαρίθμησης της β ακτινοβολίας λόγω της πολύ μικρής ενέργειας των βήτα $\approx 3 \text{ KeV}$ που είναι δύσκολο αν όχι τεχνικώς αδύνατο να ανιχνευτούν έστω και με την τεχνική του βήτα χαμηλού υποστρώματος.

Η μέθοδος εφαρμόζεται σε θειούχα ορυκτά, ιδιαίτερα σε μολυβδαινίτες και σιδηρούχους μετεωρίτες. Οι μολυβδαινίτες παρουσιάζουν την πιο υψηλή συγκέντρωση σε Re από περίπου 10 έως μερικές εκατοντάδες ppm. Στην βιβλιογραφία αναφέρεται η σύνθεση του ρενίου CuReS_4 . Σπάνιες περιπτώσεις αναφέρονται όπου το Re ξεπερνά τα 1000 ppm, όπως π.χ. σε μολυβδαινίτη της Ν.Δ. Αφρικής με 5500 ppm Re. Παράδειγμα ανάλυσης δείγματος περίπου 1 g που περιείχε 138 ppm $^{187}_{Re}$ και 7.03 ppm $^{187}_{Os}$ ραδιογενετικό έδωσε ηλικία $\approx 3.08 \times 10^9 \text{ y}$, 1ppm = 10^{-6} g/g

4.10. ΜΕΘΟΔΟΣ ΛΟΥΤΕΤΣΙΟΥ-ΧΑΦΝΙΟΥ.

Το φυσικό λουτέτσιο έχει δύο ισότοπα. Το $^{175}_{Lu}$ (97.4%) σταθερό και το $^{176}_{Lu}$ (2.6%) ραδιενεργό. Το $^{176}_{Lu}$ μεταστοιχειώνεται με β^- διάσπαση στο $^{176}_{Hf}$ ως εξής:



Η E_{max} του β^- του ${}_{71}^{176}\text{Lu}$ είναι 0.43 MeV. Οι ακτίνες γάμμα έχουν ενέργεια: 88.3 keV (13.1%), 201.8 keV (84.7%) και 306.9 keV (93.3%) που μπορούν εύκολα να μετρηθούν ιδιαίτερα η τελευταία ομάδα των γάμμα με υψηλό ποσοστό παραγωγής.

Η ηλικία πετρωμάτων δίνεται από ανάλογη προς την [4.6] σχέση:

$$\frac{{}_{72}^{176}\text{Hf}}{{}_{71}^{176}\text{Lu}} = e^{\lambda t} - 1 = e^{1.87 \times 10^{-11} t} - 1 \quad [4.32]$$

Ο λόγος του ολικού χαφνίου προς το ολικό λουτέτιο υπολογίζεται φασματοσκοπικά, η δε ισοτοπική σύσταση των μη ραδιογενετικών ισοτόπων με φασματογράφο μάζας. Τα σταθερά ισότοπα του χαφνίου στη φύση είναι τα εξής: ${}_{72}^{174}\text{Hf}$ (0.16%), ${}_{72}^{176}\text{Hf}$ (5.2%), ${}_{72}^{177}\text{Hf}$ (18.6%), ${}_{72}^{178}\text{Hf}$ (27.1%), ${}_{72}^{179}\text{Hf}$ (13.74%), και ${}_{72}^{180}\text{Hf}$ (35.2%). Η μέθοδος εφαρμόζεται σε ορυκτά των σπανίων γαιών.

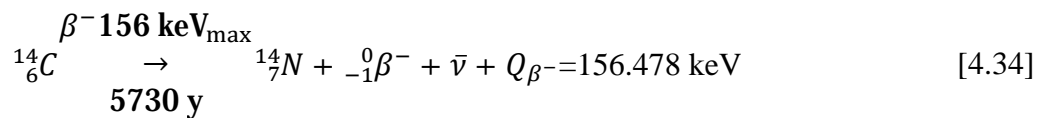
4.11. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΡΙΤΙΟΥ-ΑΝΘΡΑΚΑ (TRICARB)

A. Μέθοδος άνθρακα-14

Ο φυσικός άνθρακας αποτελείται από δύο σταθερά ισότοπα, τον ${}_{6}^{12}\text{C}$ (98.9%) και τον ${}_{6}^{13}\text{C}$ (1.1%). Ένα τρίτο ισότοπο, ο ραδιενεργός ${}_{6}^{14}\text{C}$ υπάρχει σε συγκέντρωση 0.000.000.000.107%, η δε αναλογία του ως προς τον άνθρακα-12 είναι ${}_{6}^{14}\text{C}/{}_{6}^{12}\text{C} \approx 10^{-12}$. Η ύπαρξη του οφείλεται στην συνεχή παραγωγή του στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Σε ύψος 1600m περίπου υπάρχει μια ροή από θερμικά νετρόνια που προέρχονται από τις αντιδράσεις της κοσμικής ακτινοβολίας με τα αέρια της ατμόσφαιρας. Τα νετρόνια αυτά στη συνέχεια αντιδρούν με το άζωτο σύμφωνα με την αντίδραση:



Ο σχηματιζόμενος άνθρακας-14 έχει χρόνο ημίσειας ζωής 5730 έτη, διασπάται εκπέμποντας ένα σωματίο β^- και μεταστοιχείωνεται σε ${}_{7}^{14}\text{N}$ (που αναπαράγεται) κατά το σχήμα:



Συνεπώς επιτυγχάνεται μια ισορροπία στην συγκέντρωση του ${}_{6}^{14}\text{C}$ έτσι ώστε ο ρυθμός παραγωγής του να είναι ίσος με το ρυθμό διάσπασης του.

Ο ${}_{6}^{14}\text{C}$ φυσικά δεν μένει ελεύθερος στην ατμόσφαιρα αλλά καταλήγει σε CO_2 μετά από μια διαδικασία που ακόμη δεν έχει εξακριβωθεί. Κατά μια εκδοχή ο άνθρακας αντιδρά με το οξυγόνο δίνοντας μονοξείδιο του άνθρακα που στη συνέχεια οξειδώνεται από το όζον, παράγοντας διοξείδιο του άνθρακα. Κατά μια άλλη, πιο πολύπλοκη εκδοχή, αυτό οφείλεται στη δράση του μικροοργανισμού *B. Oligocarbophilus* που ζει στο έδαφος.

Ανεξάρτητα από αυτές τις θεωρίες, η ύπαρξη του ${}_{6}^{14}\text{C}$ στο CO_2 της ατμόσφαιρας είναι πειραματικό δεδομένο και αξίζει να αναφερθεί ότι η συνολική ποσότητα του ${}_{6}^{14}\text{C}$ στην

ατμόσφαιρα είναι μόνο 950 kg, ενώ υπολογίζεται ότι θα έπρεπε να είναι περίπου 80 φορές πιο μεγάλη σύμφωνα με τις τιμές του ρυθμού παραγωγής και διάσπασης του. Η διαφορά οφείλεται στο ότι υπάρχει μια συνεχής ανταλλαγή διοξειδίου του άνθρακα μεταξύ της ατμόσφαιρας και του νερού στην επιφάνεια της γης καθώς και των ζωντανών οργανισμών (βιόσφαιρα).

Οι ζωντανοί οργανισμοί, σε συνεχή επικοινωνία με το περιβάλλον, αφομοιώνουν ^{14}C σε αναλογία ενός ατόμου, ^{14}C για κάθε $7.8 \times 10^{11} \approx 10^{12}$ άτομα σταθερού άνθρακα, ^{12}C . Μετά τον θάνατο τους, η ανταλλαγή διακόπτεται, και η αναλογία του ^{14}C προς τον σταθερό άνθρακα τον ^{12}C μειώνεται εκθετικά με τον χρόνο, με χρόνο ημίσειας ζωής αυτόν του ^{14}C , δηλαδή 5730 γ. Αν αργότερα μετρηθεί η περιεκτικότητα του συνολικού άνθρακα σε ^{14}C , μπορεί να υπολογιστεί το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε μεταξύ του θανάτου του οργανισμού και της μέτρησης.

Αρχικά 1 γραμμάριο καθαρού άνθρακα είχε ποσότητα ^{14}C , τόση ώστε να δίνει περίπου 15 διασπάσεις (β^-) ανά λεπτό. Καθόσον $\lg C = 5.01 \times 10^{22}$ πυρήνες ^{12}C ($12.01115 \text{gC} = 6.022094 \times 10^{23}$ πυρήνες ^{12}C).

$$LgC = \frac{5.01 \times 10^{22}}{7.8 \times 10^{11}} = 6.42 \times 10^{10} \text{ πυρήνες } ^{14}\text{C} \quad [4.35]$$

Αρα η ενεργότητα του ^{14}C στο 1g κοινού άνθρακα θα είναι:

$$R_0 = \lambda \cdot N_0 = \frac{0.693}{T} \cdot N_0 = \frac{0.693}{5730 \cdot 365 \cdot 86400} \cdot 6.42 \times 10^{10} \text{ dps} = 0.246 \text{ dps} \quad [4.36]$$

ή

$$R_0 = 0.246 \text{ dps} \cdot 60 \rightarrow 14.76 (\approx 15) \text{ dpm} \quad [4.37]$$

Η ενεργότητα του ^{14}C στο δείγμα μειώνεται εκθετικά με τον χρόνο σύμφωνα με τη σχέση:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad [4.38]$$

Η οποία δίνει:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{N_0}{N} \quad [4.39]$$

Αν η μέτρηση δώσει μια ενεργότητα R διάσπασης ανά λεπτό για κάθε γραμμάριο άνθρακα που περιέχεται στο δείγμα, τότε η ηλικία του δείγματος θα είναι:

$$t = \frac{T}{0.693} \ln \frac{N_0}{N} = t = \frac{T}{0.693} \ln \frac{R_0}{R} = \frac{5730}{0.693} \ln \frac{15}{R} = 8268.4 \ln \frac{15}{R} \quad [4.40]$$

$$8268.4 \cdot 2.303 \log \frac{15}{R} = 19042 \log \frac{15}{R} \text{ έτη}$$

και

$$t = 19042 \log \frac{15}{R} \text{ έτη} \quad [4.41]$$

Σημειώνεται ότι το R σε dpm/gC.

Η μέτρηση της ενεργότητας του δείγματος παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες. Ο μετρούμενος ρυθμός είναι συνήθως της τάξης του $1 \beta^{-1}$ ανά 10 λεπτά ($0.1 \beta^{-1}$ το λεπτό) για κάθε ένα γραμμάριο άνθρακα. Επειδή δε τα β^{-1} έχουν μέγιστη ενέργεια μόνο 156 keV (το δε $1/e$ της μέγιστης ενέργειας είναι 57.4 keV), πολύ μικρή για να αποφευχθεί η αυτοαπορρόφηση στο δείγμα, ο άνθρακας-14 πρέπει να απομονωθεί. Αυτό γίνεται συνήθως με την καύση του δείγματος και την συλλογή του CO_2 και τότε χρησιμοποιείται σαν το αέριο πλήρωσης ενός απεριθμητή Geiger-Muller συνεχούς ροής αερίου. Έτσι η απόδοση του ανιχνευτή γίνεται μέγιστη. Σε πιο πρόσφατη τεχνική, ο άνθρακας-14 του δείγματος, αφού απομονωθεί, χρησιμοποιείται στην κατασκευή οργανικού σπινθηριστή. Πολύ πιο μεγάλες ποσότητες μπορούν να μετρηθούν μ' αυτόν τον τρόπο, χωρίς αυτοαπορρόφηση, και με μεγαλύτερη ακρίβεια (μικρά στατιστικά σφάλματα).

Το υπόστρωμα γι' αυτές τις μετρήσεις πρέπει να μειωθεί στο ελάχιστο (της τάξης του 0.5 cm). Γι' αυτό τον λόγο χρησιμοποιείται κατάλληλη τεχνολογία του απεριθμητή χαμηλού υποστρώματος που σε γενικές γραμμές έχει ως ακολούθως: Ο κύριος απεριθμητής περιβάλλεται από δεύτερο απεριθμητή, τον αντιαπεριθμητή, που καταμετρά κάθε σωματίο ή φωτόνιο ακτινοβολίας γάμμα που προέρχεται από το περιβάλλον, η την κοσμική ακτινοβολία κυρίως. Αν υπάρχουν ταυτόχρονα σήματα από τους δύο απεριθμητές, ο παλμός δεν καταγράφεται (αντισύμπτωση). Επίσης, σε περιπτώσεις που ο ανιχνευτής που χρησιμοποιείται δίνει σήμα ανάλογο με την ενέργεια που έχασε το σωματίδιο μέσα στο υλικό του ανιχνευτή (π.χ. αναλογικός απεριθμητής ή σπινθηριστής), τότε χρησιμοποιείται αδιευκρίνιστης ενός παραθύρου που απορρίπτει όλους τους χαμηλούς παλμούς που οφείλονται σε ηλεκτρονικό θόρυβο και όσους αντιστοιχούν σε ενέργεια μεγαλύτερη από αυτή των πιο ενεργητικών β^{-} του ^{14}C ($E_{\beta^{-}}=0.156$ MeV).

Ηλικίες μέχρι ≈ 60000 y ($10T_{1/2} = 10 \cdot 5730$ y), έχουν μετρηθεί, με σφάλματα μικρότερα του 10%. Η μέθοδος προϋποθέτει ότι η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας έχει μείνει η ίδια τα τελευταία 50-60 χιλιάδες χρόνια. Σύγκριση με αποτελέσματα δενδροχρονολόγηση (μετρώντας δακτυλίους σε κορμούς δένδρων) έδειξε ότι αυτό δεν είναι απόλυτα σωστό και ότι μικρές διορθώσεις είναι αναγκαίες. Άλλο πρόβλημα είναι η διεύθυνση ζωντανών οργανισμών στο δείγμα και γι' αυτό τα δείγματα καθαρίζονται με προσοχή. Επίσης, όπου είναι δυνατόν, γίνονται πολλές μετρήσεις σε διαφορετικά δείγματα από τον ίδιο αρχαιολογικό χώρο.

Τελευταία οι εκρήξεις ατομικών βομβών έχουν διαταράξει κάπως την ισορροπία του ^{14}C στην ατμόσφαιρα. Μέχρι το 1962, περίπου 3500 kg ^{14}C είχαν παραχθεί από πυρηνικές εκρήξεις. Στο μέλλον θα είναι αναγκαίο να γίνουν οι κατάλληλες διορθώσεις, εκτός φυσικά αν οι βόμβες εκπληρώσουν τον προορισμό τους και εξαλείψουν κάθε δείγμα πολιτισμού για χρονολόγηση.

Μερικά παραδείγματα ηλικιών που βρέθηκαν με τη μέθοδο ^{14}C , αναφέρονται ιστορικά και έχουν ως ακολούθως:

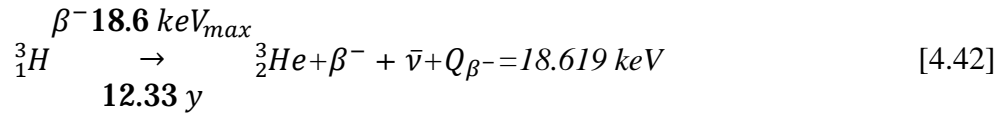
Βιβλίο του Ισαία	1920±200 έτη
Σπόροι λοτού από Μαντζούρια (γόνοιμοι!)	1040±200 έτη
Σάνδαλα (Ορεγκον, ΗΠΑ)	9050±350 έτη
Ξύλο από Αιγυπτιακό τάφο	4880±200 έτη
Κάρβουνο από το Σουδάν	5060±450 έτη
Ξύλο από παγετώνα	16400±1000 έτη
Πετρέλαιο (Καλιφόρνια)	>28000 έτη

Η μέθοδος του άνθρακα-14 εφαρμόστηκε πρόσφατα (Οκτώβριος 1988) στην «σινδόνα του Τορίνου», που έχει μήκος 4.34 μέτρα και πλάτος 1 μέτρο, ύστερα από εισήγηση του

Βατικανού και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το ύφασμα έχει κατασκευασθεί και ζωγραφιστεί στην περίοδο 1260-1390 μ.Χ και συνεπώς δεν ήταν το σάβανο που χρησιμοποιήθηκε για την ταφή του Χριστού.

B. Μέθοδος τριτίου

Το τρίτιο ${}^3_1\text{H}$ ή ${}^3_1\text{T}$ ή απλά T είναι το τρίτο ισότοπο του υδρογόνου. Τα άλλα δύο είναι το ${}^1_1\text{H}$ ή H το κοινό υδρογόνο και το ${}^2_1\text{H}$ ή ${}^2_1\text{D}$ η απλά D το δευτέριο. Το τρίτιο είναι β^- ραδιενεργό με χρόνο ημισείας ζωής 12.3 έτη και διασπάται σε ${}^3_2\text{He}$ κατά το σχήμα:



Η αναλογία του τριτίου με το κοινό υδρογόνο στο νερό της βροχής (φυσικό νερό) είναι μερικές μονάδες τριτίου:

$$1 \text{ TU} = \frac{T}{H} \approx 10^{-18} \quad [4.43]$$

ή

$$1 \text{ TU} = 7.2 \times 10^{-3} \text{ dpm/gr H}_2\text{O} = 3.23 \text{ pCi/l H}_2\text{O} \quad [4.44]$$

Δηλαδή, ένας πυρήνας τριτίου αναλογεί για κάθε 10^{18} πυρήνες υδρογόνου στο τριτιωμένο νερό (HTO). Αυτή η αναλογία καλείται και μονάδα τριτίου TU (tritiumunit).

Η ειδική ενεργότητα του τριτίου στη φύση είναι από 5-10 pCi/l νερού π.χ. των λιμνών. Σε νερά του Ειρηνικού, μετρήσεις που έγιναν το 1963 έδειξαν περιεκτικότητα σε τρίτιο από 8 έως 13 TU. Εντελώς όμοια όπως και στον άνθρακα-14 θα έχουμε την ανάλογη σχέση για την ηλικία.

$$t = \frac{T}{0.693} \ln \frac{R_0}{R} \text{ έτη} \quad [4.45]$$

ή κατά προσέγγιση

$$t = 40.88 \log \frac{7.2 \times 10^{-3}}{R} \text{ έτη} \quad [4.47]$$

Όπου:

R = η ενεργότητα του τριτίου σε dpm/g νερού.

Η μέθοδος τριτίου εφαρμόζεται για χρονολογήσεις δειγμάτων με ηλικίες της τάξης των 10 ημιζών του τριτίου, δηλαδή της τάξης των περίπου 100 ετών. Ευρεία εφαρμογή έχει στη ραδιοχρονολόγηση των «παλαιωμένων» αλκοολούχων ποτών (αλκοόλη $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) στα οποία, λόγω του τριτιωμένου νερού από το οποίο προέρχονται, μόρια της αλκοόλης περιέχουν πυρήνες τριτίου, $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OT}$.

Ο προσδιορισμός της ενεργότητας του τριτίου στο δείγμα γίνεται όπως και στον άνθρακα-14 με σύστημα υγρού σπινθηριστή (σύστημα απαριθμητή χαμηλού υποστρώματος της τάξης του 0.5 cpm). Το σύστημα αυτό, κοινό και στα δύο ισότοπα, φέρει συχνά το όνομα TRI-CARB από τις λέξεις Tritium-Carbon (Τρίτιο-Άνθρακας).

4.12. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΓΓΡΑΦΗΣ ΙΧΝΩΝ ΣΧΑΣΗΣ

Η μέθοδος γεωχρονολόγησης με ανιχνευτές ιχνών, FTD (fission track dating=χρονολόγηση με εγγραφή ιχνών σχάσης), χρησιμοποιείται εδώ και πάνω από είκοσι χρόνια και μπορεί να θεωρηθεί ότι δίνει αξιόπιστες ηλικίες, χρήσιμες σε διάφορες μορφές γεωλογικού περιβάλλοντος.

Από την αρχή της η τεχνική έχει υποστεί πολλές τροποποιήσεις και βελτιώσεις. Η σπουδαιότερη απ' αυτές βασίζεται στη διαφορά που παρουσιάζεται στο τμήμα των εμβλειών που αναπτύσσεται με χημική διάβρωση των ιχνών μεταξύ της αυθόρμητης και της επαγόμενης σχάσης.

Μια απλουστευμένη σχέση, που δίνει την ηλικία δείγματος με την μέθοδο εγγραφής των ιχνών σχάσης είναι η ακόλουθη:

$$t = 1.49 \times 10^4 \log_{10} (1 + 7.49 \times 10^{-18} \frac{\rho_s \Phi}{\rho_i}) My \quad [4.48]$$

Όπου:

ρ_s και ρ_i = οι πυκνότητες των ιχνών (ίχνη/cm²) από αυθόρμητη (spontaneous) σχάση που έλαβε χώρα κατά την χρονική διάρκεια t και επαγόμενη (induced) σχάση που μπορεί να λάβει χώρα σε αντιδραστήρα

Φ = η ολοκληρωμένη ροή θερμικών νετρονίων

Η τιμή της σταθεράς της αυθόρμητης σχάσης του ^{238}U είναι $\lambda_f = 8.7 \times 10^{-17} y^{-1}$, ενώ η σταθ. διάσπασης του ^{238}U είναι ως γνωστόν $\lambda = \frac{0.693}{T} = \frac{0.693}{4.5 \times 10^9} = 1.54 \times 10^{-10} y^{-1}$ περίπου 6 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη. Η ηλικία t υπολογίζεται σε My (εκατομμύρια έτη).

Η μέθοδος εφαρμόστηκε σε δείγματα μοσχοβίτη (moscovite) έδωσε ηλικίες από 400 έως 1250 εκατομμύρια έτη. Προσδιορίστηκαν επίσης ηλικίες απάτητων με τη μέθοδο εγγραφής ιχνών σχάσης, της τάξης των 250 εκατομμυρίων ετών. Η μέθοδος εφαρμόζεται και σε άλλα ορυκτά όπως ο τιτανίτης (sphene), το ζirkόνιο (zircon), το επίδοτο (epidote), ο αλλανίτης (allanite), ο μοναζίτης και ιδιαίτερα η μίκα. Τα ορυκτά αυτά απαντούν μέσα σε γρανίτες, σε γνεύσιους, σε ηφαιστειογενή πετρώματα, σε τέφρες, σε πορώδεις λίθους ακόμα και σε ψαμίτες. Σε όλα τα ανωτέρω ορυκτά απαντάται το ουράνιο σε συγκεντρώσεις της τάξης του ενός μέχρι και δεκάδων ppm (1 ppm ουρανίου-238 αντιστοιχεί σε 3 pCi ^{238}U ανά g δείγματος). Το πιο κατάλληλο υλικό για ραδιοχρονολογήσεις με τη μέθοδο αυτή είναι η φυσική ύαλος. Μεταξύ των φυσικών υάλων περισσότερο ενδιαφέρον στην εγγραφή των ιχνών σχάσης παρουσιάζει ο οψιδιανός (obsidian). Ο οψιδιανός περιέχει ουράνιο μέχρι περίπου 20 ppm (2220 BqKg⁻¹).

4.13. ΜΕΘΟΔΟΣ ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑΣ

4.13.1. Εισαγωγή στο φαινόμενο της θερμοφωταύγειας

Στους ιοντικούς ή διηλεκτρικούς κρυστάλλους, ο αριθμός των ελευθέρων φορτίων σε χαμηλές θερμοκρασίες είναι πολύ μικρός (μικρή αγωγιμότητα). Συνεπώς όταν ένας διηλεκτρικός κρύσταλλος εκτεθεί σε ιονιστική ακτινοβολία, δημιουργούνται ελεύθερα φορτία

(ηλεκτρόνια και οπές) λόγω του ιονισμού που προκαλείται. Ο μεγαλύτερος αριθμός αυτών των φορτίων επανασυνδέεται (ένα ηλεκτρόνιο με μια οπή) αμέσως μετά τη διέλευση του ιονιστικού σωματιδίου, αλλά ένα μικρό ποσοστό μένει ελεύθερο και μπορεί να κινηθεί μέσα στον κρύσταλλο για ένα μικρό χρονικό διάστημα. Αν ο κρύσταλλος δεν είναι τέλειος, αν δηλαδή περιέχει προσμίξεις ξένων ατόμων, έχει κενά (ατέλειες) στο πλέγμα, ή και άτομα από τα οποία αποτελείται, σε ενδιάμεσες θέσεις στο πλέγμα, τότε τα ελεύθερα φορτία από ιονισμό μπορούν να συλληφθούν-αρπαχθούν και να παγιδευτούν στις ατέλειες αυτές.

Το χρονικό διάστημα που μένει παγιδευμένο ένα ελεύθερο φορτίο σε μια παγίδα εξαρτάται από την ενέργεια που θα χρειαστεί να αποκτήσει το φορτίο (ηλεκτρόνιο ή οπή) προκειμένου να ξεφύγει από την παγίδα. Την ενέργεια αυτή θα την αποκτήσει από τα γειτονικά άτομα και τα ηλεκτρόνια τους και επειδή η μέση κινητική ενέργεια των ατόμων εξαρτάται από τη θερμοκρασία του κρυστάλλου, η θερμοκρασία επηρεάζει δραστικά τον χρόνο παραμονής των φορτίων στις παγίδες.

Ένα παγιδευμένο ηλεκτρόνιο (ή οπή) που χρειάζεται ενέργεια E για να ξεφύγει από μια παγίδα, έχει πιθανότητα ανά μονάδα χρόνου να αποκτήσει την ενέργεια E , ίση με:

$$P = a \cdot e^{-E/kT} \text{ sec}^{-1} \quad [4.49]$$

Όπου:

T = η (απόλυτη) θερμοκρασία του κρυστάλλου

E = το ενεργειακό βάθος της παγίδας

a = ένας παράγοντας συχνότητας χαρακτηριστικός του κρυστάλλου και (ίσως) της παγίδας $k = 8.616 \cdot 10^{-5} \text{ eV}/\text{O}_K$ είναι η σταθερά του Boltzmann.

Αν συνολικά έχουμε n ηλεκτρόνια παγιδευμένα σε παγίδες ενός είδους, τότε ο ρυθμός (δηλ. ηλεκτρόνια ανά μονάδα χρόνου) με τον οποίο ελευθερώνονται είναι:

$$\frac{dn}{dt} = a \cdot e^{-E/kT} \cdot n \quad (\eta\lambda/\text{sec}) \quad [4.50]$$

Η σχέση αυτή μας θυμίζει το νόμο της ραδιενέργειας αν θεωρήσουμε σαν σταθερά διάσπασης λ την πιθανότητα p ανά μονάδα χρόνου ώστε το παγιδευμένο ηλεκτρόνιο να αποκτήσει την ενέργεια E , δηλαδή:

$$\lambda = a \cdot e^{-E/kT} \quad (\text{sec}^{-1}) \quad [4.51]$$

Η ομοιότητα είναι βέβαια μόνο μαθηματική αλλά σε αναλογία με τη ραδιενέργεια μπορούμε να πούμε ότι ο αριθμός των παγιδευμένων ηλεκτρονίων σε σταθερή θερμοκρασία θα μειώνεται εκθετικά με τον χρόνο με μια ημιζωή.

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{a} e^{E/kT} \quad (\text{sec}) \quad [4.52]$$

Η ημιζωή είναι μεγάλη για βαθιές παγίδες (μεγάλο E) και για μικρές θερμοκρασίες, T . Έτσι ανάλογα με το είδος των παγίδων μπορούμε να έχουμε φορτία παγιδευμένα για χρονικά διαστήματα από msec, μέχρι πολλά εκατομμύρια χρόνια. Γι' αυτά τα χρονικά διαστήματα μένει δηλαδή «παγιδευμένη» στον κρύσταλλο η πληροφορία ότι έχει εκτεθεί σε ιονιστική ακτινοβολία, δηλαδή έχει απορροφήσει δόση.

Αν τώρα ένα ηλεκτρόνιο ελευθερωθεί από την παγίδα του, θα κινηθεί μέσα στον κρύσταλλο μέχρι που να συναντήσει μια οπή (παγιδευμένη και αυτή), με την οποία θα συνδεθεί. Θα κάνει δηλαδή ουδέτερο ένα άτομο το οποίο χρειαζόταν ένα ηλεκτρόνιο. Κατά

την επανασύνδεση ηλεκτρονίου-οπής, το πλεόνασμα ενέργειας των δύο φορτίων θα δοθεί κυρίως στον κρύσταλλο σαν θερμική ενέργεια, ενώ ένα μέρος θα εκπεμφθεί σαν φωτόνιο ορατού φωτός (2.4 eV). Αυτό το φως ονομάζεται θερμοφωταύγεια (TL=Thermoluminescence).

4.13.2. Χαρακτηριστικά Θερμοφωταύγειας

a. Φωτοκαμπύλη

Ο ρυθμός με τον οποίο απελευθερώνονται τα ηλεκτρόνια από τις παγίδες μπορεί να επιταχυνθεί αν η θερμοκρασία του κρυστάλλου αυξηθεί. Στην πράξη η θερμοκρασία του κρυστάλλου αυξάνεται γραμμικά με τον χρόνο, από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος (20°C) μέχρι μια μέγιστη θερμοκρασία T_{max} (έστω 400°C) με σταθερό ρυθμό β (ταχύτητα θέρμανσης 1- 10°C/sec), είναι:

$$\delta \varepsilon \frac{\beta \cdot E}{kT_{max}^2} = a \cdot e^{-E/kT_{max}} \quad [4.53]$$

Η σχέση αυτή προκύπτει από τη λύση της εξίσωσης [4.50] για την περίπτωση της T_{max} .

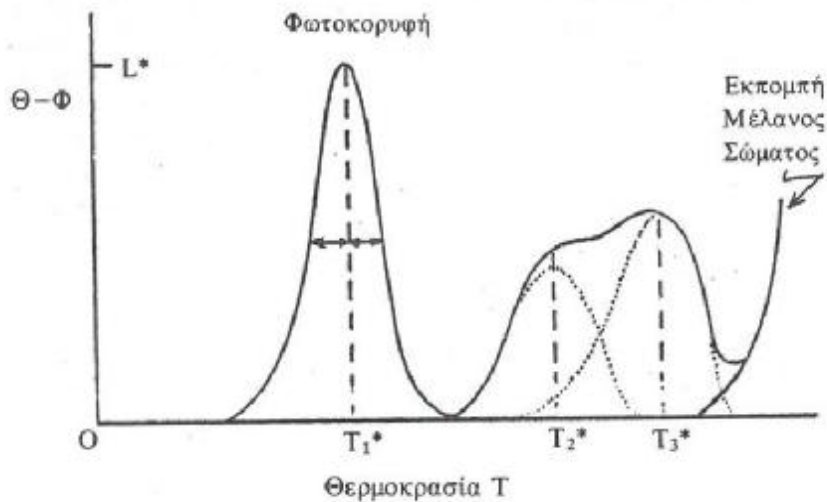
Η θερμοφωταύγεια μπορεί να μετρηθεί με ένα φωτοπολλαπλασιαστή, που είναι ευαίσθητος στο ορατό φως και που θα δώσει ηλεκτρικό ρεύμα ανάλογο με την ένταση του φωτός στο οποίο εκτίθεται. Το ρεύμα αυτό μπορούμε να το καταγράψουμε σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Η γραφική αυτή παράσταση ονομάζεται φωτοκαμπύλη (Σχήμα 10) η θερμοφωταύγεια σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας του κρυστάλλου.

Ας εξετάσουμε τώρα τι συμβαίνει κατά την θέρμανση ενός κρυστάλλου που έχει εκτεθεί σε ιονιστική ακτινοβολία, και θεωρώντας, αρχικά ηλεκτρόνια παγιδευμένα σε ένα είδος παγίδων (δηλ. συγκεκριμένες τιμές E και a). Σε χαμηλές θερμοκρασίες, η πιθανότητα να διαφύγουν τα ηλεκτρόνια από τις παγίδες είναι μικρή και επομένως και η ένταση της θερμοφωταύγειας είναι χαμηλή. Αυξάνοντας την θερμοκρασία, αυξάνεται και ο ρυθμός διαφυγής καθώς και η ένταση της θερμοφωταύγειας, μειώνεται όμως ταυτόχρονα και ο αριθμός των ηλεκτρονίων που παραμένουν παγιδευμένα. Έτσι η ένταση της θερμοφωταύγειας θα φτάσει ένα μέγιστο και μετά θα πέσει στο μηδέν όταν όλες οι παγίδες έχουν αδειάσει.

Για παγίδες ενός είδους καταγράφεται στη φωτοκαμπύλη μια κορυφή, η φωτοκορυφή (Σχήμα 10). Η θερμοκρασία στην οποία παρουσιάζεται το μέγιστο της φωτοκορυφής εξαρτάται από το βάθος των παγίδων, E , τον παράγοντα συχνότητας, a και τον ρυθμό θέρμανσης β . Η διάρκεια του αδειάσματος είναι της τάξης μερικών sec κι έτσι η φωτοκορυφή έχει πλάτος μερικές δεκάδες °C.

Αν η αύξηση της θερμοκρασίας συνεχιστεί, θα αρχίσει το άδειασμα παγίδων με μεγαλύτερο βάθος E κι έτσι θα παρατηρηθούν κι άλλες φωτοκορυφές. Οι διάφορες φωτοκορυφές, που είναι χαρακτηριστικές του κρυστάλλου και των προσμίξεων του μπορεί να μη διαχωρίζονται στην φωτοκαμπύλη αλλά να δίνουν ένα πολύπλοκο σχήμα.

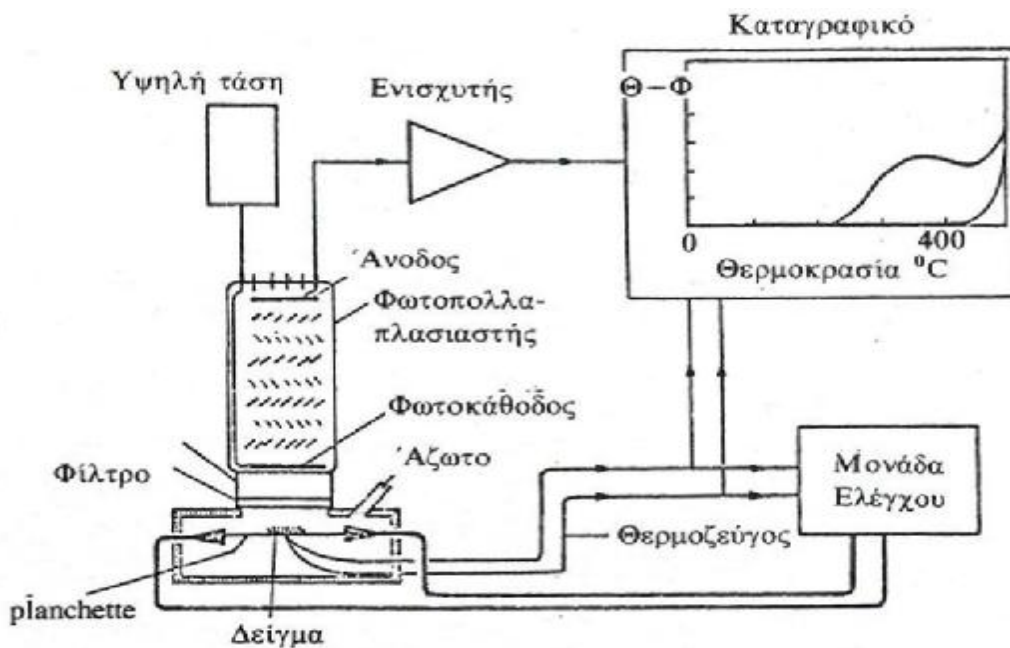
Σε μια θερμοκρασία, συνήθως 300-400 °C, η εκπομπή φωτός «μέλανος σώματος» από τον κρύσταλλο γίνεται αρκετά έντονη ώστε η ένταση του φωτός να αυξάνει απότομα με την θερμοκρασία. Αρχίζει δηλαδή ο κρύσταλλος να «ερυθροπυρώνεται». Πέρα από αυτή την θερμοκρασία είναι αδύνατη η παρατήρηση θερμοφωταύγειας. Συνήθως μετά την πρώτη θέρμανση γίνεται και δεύτερη για να μετρηθεί το φως που οφείλεται στην εκπομπή μέλανος σώματος. Η διαφορά των δύο μετρήσεων δίνει την θερμοφωταύγεια.



Σχήμα 10: Η θερμοφωταύγεια σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας κατά την θέρμανση του κρυστάλλου.

b. Μέτρηση της θερμοφωταύγειας.

Σχηματικά το αναλυτικό σύστημα που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της θερμοφωταύγειας, παρουσιάζεται στο Σχήμα 11. Ο κρύσταλλος τοποθετείται πάνω σ' ένα μεταλλικό πλακίδιο (planchette) το οποίο διαρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, αυξάνοντας έτσι τη θερμοκρασία του.



Σχήμα 11: Σχηματικό διάγραμμα αναλυτικού συστήματος για τη μέτρηση της θερμοφωταύγειας.

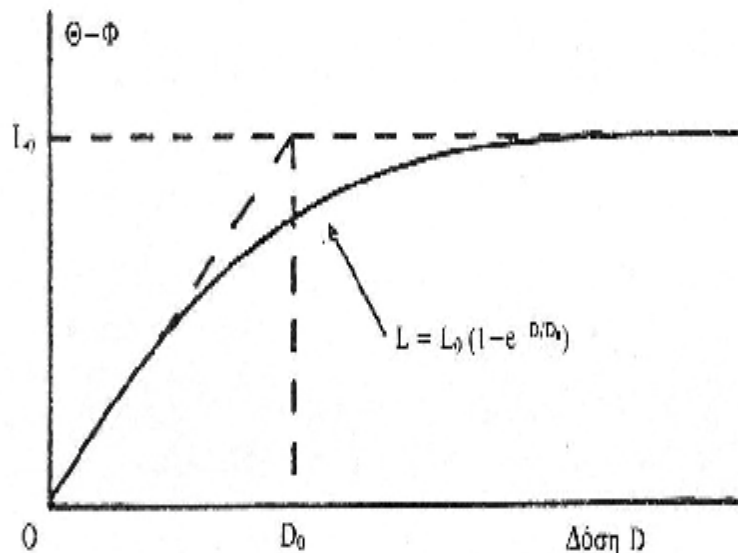
Η θερμοκρασία της πλανσέτας μετριέται από ένα θερμοζεύγος. Το ρεύμα θέρμανσης της πλανσέτας δίνεται από ένα τροφοδοτικό και η μέτρηση της θερμοκρασίας γίνεται μέσω

του σήματος του θερμοζεύγους ενώ η ένταση του ρεύματος ρυθμίζεται ώστε η αύξηση της θερμοκρασίας να είναι γραμμική.

Την ένταση της θερμοφωταύγειας μετρά ένας φωτοπολλαπλασιαστής. Η φωτοκαμπύλη καταγράφεται σ' ένα καταγραφικό του οποίου η γραφίδα κινείται κατά τον άξονα των x ανάλογα με το σήμα του θερμοζεύγους (θερμοκρασία) και κατά τον άξονα των y ανάλογα με το ρεύμα από τον φωτοπολλαπλασιαστή (ένταση φωτός, θερμοφωταύγεια). Η θέρμανση γίνεται μέσα σε ατμόσφαιρα καθαρού αζώτου για να αποφευχθεί οξείδωση της επιφάνειας του κρυστάλλου που συνοδεύεται από εκπομπή φωτός (χημειοφωταύγεια).

c. Η θερμοφωταύγεια σαν συνάρτηση της δόσης

Η ολική ποσότητα του φωτός ή η επιφάνεια μιας φωτοκορυφής είναι ανάλογη με τον αριθμό ηλεκτρονίων που ήταν αρχικά παγιδευμένα στις παγίδες που αντιστοιχούν σε αυτή την κορυφή. Το ίδιο ισχύει και για το ύψος της φωτοκορυφής αφού η επιφάνεια είναι ανάλογη του ύψους. Μπορούμε δηλαδή να χρησιμοποιήσουμε το ύψος ή την επιφάνεια μιας φωτοκορυφής σαν μέτρο του αριθμού παγιδευμένων ηλεκτρονίων και κατ' επέκταση της ολικής δόσης που έχει απορροφήσει ο κρύσταλλος. Αυτή είναι φυσικά η δόση από την τελευταία θέρμανση του δείγματος που άδειασε όλες τις παγίδες.



Σχήμα 12: Η θερμοφωταύγεια κόρου σαν συνάρτηση της δόσης

Στις πιο ευνοϊκές περιπτώσεις η θερμοφωταύγεια παρουσιάζει μια γραμμική αύξηση για χαμηλές δόσεις και φτάνει εκθετικά με την δόση σε μια μέγιστη τιμή όταν όλες οι παγίδες γεμίσουν (Σχήμα 12). Δίνεται δηλαδή η θερμοφωταύγεια από μια σχέση της μορφής:

$$L = L_0(1 - e^{-D/D_0}) \quad [4.54]$$

Όπου:

D_0 = η δόση κόρου

L_0 = η μέγιστη ποσότητα θερμοφωταύγειας, στην οποία φτάνει για μεγάλες δόσεις.

Σε ορισμένα υλικά όμως η αρχική αύξηση της θερμοφωταύγειας είναι υπεργραμμική, δηλαδή η κλίση της καμπύλης αυξάνει με την δόση. Συμβαίνει επίσης, σε μερικές

περιπτώσεις, μετά από ένα μέγιστο η θερμοφωταύγεια να μειωθεί με την αύξηση της δόσης ή και να εξαφανιστεί τελείως.

Όσο αφορά την ευαισθησία, δηλαδή την ποσότητα θερμοφωταύγειας ανά μονάδα δόσης (rad) έχει βρεθεί ότι είναι η ίδια για σωμάτια βήτα και ακτίνες γάμμα η X ενώ για τα σωμάτια άλφα είναι μικρότερη κατά ένα παράγοντα περίπου 10. Αυτό οφείλεται στον έντονο ιονισμό που προκαλούν τα σωμάτια άλφα, με αποτέλεσμα η μικροσκοπική δόση γύρω από την τροχιά του σωματιδίου να ξεπερνά κατά πολύ την δόση κόρου ώστε ένας μεγάλος αριθμός ελεύθερων φορτίων (ηλεκτρόνια ή οπές) να επανασυνδέεται με αντίθετα φορτία (οπές ή ηλεκτρόνια) αφού δεν υπάρχουν ελεύθερες παγίδες στις οποίες να παγιδευθούν.

d. Δοσιμετρία με θερμοφωταύγεια.

Αν ένας κρύσταλλος έχει βαθμολογηθεί, έχει δηλαδή βρεθεί η ποσότητα L (η θερμοφωταύγεια) που δίνει για μια ορισμένη δόση (Σχήμα 12) είναι δυνατόν ο κρύσταλλος αυτός να χρησιμοποιηθεί για δοσιμετρία. Για να βρούμε την δόση που έχει απορροφήσει ένας κρύσταλλος, απλώς μετρούμε την θερμοφωταύγεια του και βρίσκουμε σε ποια δόση αντιστοιχεί η ποσότητα L που μετρήθηκε χρησιμοποιώντας την καμπύλη βαθμολόγησης. Αυτή η δόση φυσικά έχει απορροφηθεί από τον κρύσταλλο από την τελευταία φορά που θερμάνθηκε.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά ενός κρυστάλλου για να είναι χρήσιμος σαν δοσίμετρο θερμοφωταύγειας είναι:

- Να διατηρεί τη θερμοφωταύγεια του σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, δηλαδή να μην παρατηρείται θερμικό άδειασμα των παγίδων πριν από την μέτρηση.
- Να μην είναι ευαίσθητος στο φως. Ανάλογα με το υλικό το φως μπορεί σε μερικές περιπτώσεις να γεμίσει ή να αδειάσει παγίδες.
- Να μην εξαρτάται η ποσότητα L από την ενέργεια των ιονιστικών σωματιδίων, αλλά μόνο από την ολική δόση που απορροφήθηκε, να μην υπάρχουν δηλαδή φαινόμενα κόρου.
- Να έχει μεγάλη ευαισθησία, δηλαδή ένταση θερμοφωταύγειας ανά μονάδα δόσης (rad).
- Τέτοιοι κρύσταλλοι είναι το LiF (Mg,Ti) ή TDL 100 με προσμίξεις ειδικά διαλεγμένες για μεγάλη ευαισθησία, το CaF₂ (Dy) ή TDL 200 το φυσικό CaF₂ και το CaSO₄ (Mn). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για δόσεις από μερικά mrad μέχρι σχεδόν 10⁶ (Mrad) από α,β,γ και X, ακτινοβολίες.

e. Χρονολόγηση με θερμοφωταύγεια

Η χρονολόγηση με τη μέθοδο της θερμοφωταύγειας (TL dating) γίνεται ως ακολούθως, αν ένα δείγμα είχε θερμανθεί σε θερμοκρασίες πάνω από 400°C, στο περιβάλλον το οποίο βρέθηκε, τότε όλα τα παγιδευμένα φορτία θα είχαν ελευθερωθεί. Αν επίσης το δείγμα είχε απορροφήσει δόση από τη θέρμανση μέχρι σήμερα, όταν μετρηθεί θα εκπέμψει θερμοφωταύγεια που θα είναι ένα μέτρο της δόσης και επομένως του χρονικού διαστήματος μεταξύ της τελευταίας θέρμανσης και της μέτρησης.

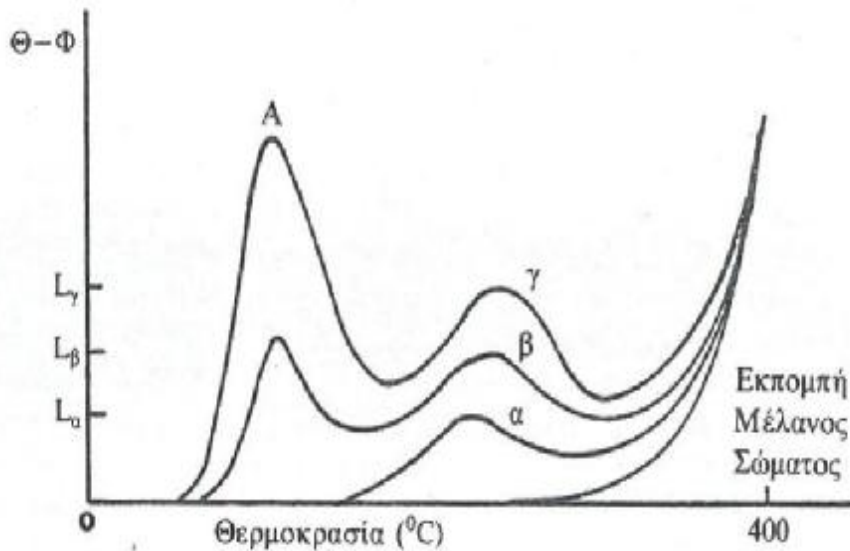
Για να βρεθεί η ηλικία του δείγματος, χρειάζεται να προσδιοριστεί:

- Η ολική δόση που έχει απορροφήσει από το περιβάλλον δηλαδή η φυσική δόση και
- Ο ρυθμός με τον οποίο έχει ακτινοβοληθεί κατά το χρονικό αυτό διάστημα.

Ο τρόπος με τον οποίο μετρούνται η ολική δόση και ο ρυθμός δόσης είναι ο ακόλουθος:

Ø Φυσική δόση

Αν το δείγμα περιέχει κρυστάλλους που εκπέμπουν θερμοφωταύγεια, στην περίπτωση που αυτοί θερμανθούν θα δώσουν μια φωτοκαμπύλη, τη φυσική φωτοκαμπύλη που θα οφείλεται στη φυσική δόση του δείγματος από το περιβάλλον καθόλη την ιστορία του («ηλικία») από τότε που θερμάνθηκε. Η φωτοκαμπύλη λαβαίνεται με ειδικό αναλυτικό σύστημα μετρήσεως θερμοφωταύγειας. Κρύσταλλοι από το ίδιο δείγμα ακτινοβολούνται με γνωστές δόσεις πριν από την μέτρηση. Οι φωτοκαμπύλες τους θα δείχνουν θερμοφωταύγεια, μέρος της οποίας θα οφείλεται στη φυσική δόση και άλλο στη δόση που δόθηκε με την ακτινοβολήση. Οι κορυφές που εμφανίζονται σε χαμηλές θερμοκρασίες συχνά δεν υπάρχουν στην φυσική φωτοκαμπύλη γιατί οι ξέβαθες παγίδες αδειάζουν στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος, υπάρχουν όμως στις φωτοκαμπύλες μετά από ακτινοβολήση αν η μέτρηση γίνει αμέσως μετά την ακτινοβολήση.



Σχήμα 13: Θερμοκαμπύλες για διάφορες δόσεις ακτινοβολήσης του κρυστάλλου

Ø Ρυθμός δόσης

Η φυσική δόση οφείλεται στην ραδιενέργεια του δείγματος και του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο βρέθηκε. Η ραδιενέργεια αυτή προέρχεται από τις φυσικές ραδιενεργές σειρές του ουρανίου, του θορίου και από το ισότοπο ^{40}K του καλίου. Επίσης η κοσμική ακτινοβολία πρέπει να ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό του ρυθμού δόσης. Αν ένα δείγμα (οποιοδήποτε αντικείμενο) περιέχει 1 ppmU, 1ppmTh και 1% K θα ακτινοβολείται κατά την διάρκεια του χρόνου t , με σωμάτια α, β και ακτίνες γ με τους ακόλουθους ρυθμούς (σε mrad/y):

	Από α	Από β	Από γ	Ολικός* Ρυθμός
1ppm U	266	12.1	23.4	62.1
1ppm Th	69.5	2.3	6.6	15.9
1% K	0.0	71.5	21.6	93.1

Πίνακας 7: Ετήσιες δόσεις των φυσικών ραδιενεργών σε mrad/yr

Από την κοσμική ακτινοβολία ο ρυθμός δόσης είναι περίπου 30 mrad/yr στην επιφάνεια του εδάφους και 15 mrad/y σε βάθος 60 cm.

Στον υπολογισμό του ρυθμού δόσης πρέπει να ληφθεί υπόψη και το μέγεθος του κρυστάλλου γιατί τα σωμάτια α και β έχουν μικρή εμβέλεια. Έτσι τα σωμάτια α από το περιβάλλον που δεν ακτινοβολούν πιο βαθιά από 20 μέχρι 30 μm από την επιφάνεια του κρυστάλλου δεν λαμβάνονται υπόψη για κόκκους με διαμέτρους πάνω από περίπου 100 μm. Για μικρούς κόκκους τα σωμάτια β των ραδιενεργών του ίδιου του δείγματος δεν λαμβάνονται υπόψη γιατί έχοντας εμβέλειες της τάξης του mm θα δώσουν το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας τους στο περιβάλλον. Το ίδιο συμβαίνει σε μεγαλύτερο βαθμό με τις ακτίνες γ για τις οποίες υπολογίζουμε μόνο το ρυθμό δόσης από το περιβάλλον.

Η ηλικία του δείγματος δίνεται από τον λόγο:

$$T = \frac{D_0}{D} = \frac{\text{Φυσική Δόση (rad)}}{\text{Ρυθμός Δόσης (rad/y)}} \quad [4.55]$$

Η σχέση αυτή έχει έννοια φυσικά με την προϋπόθεση ότι η θερμοφωταύγεια δεν έχει φτάσει σε κόρο και ότι η μεταβολή της με την δόση είναι γραμμική για μικρές δόσεις ώστε η προέκταση της καμπύλης στο διάγραμμα L-D (θερμοφωταύγεια-δόση) για την εύρεση της φυσικής δόσης D_0 να δικαιολογείται.

Στην περίπτωση που η θερμοφωταύγεια οφείλεται αποκλειστικά στο ^{238}U , η ηλικία του δείγματος των υλικών θα δίνεται από την σχέση:

$$t = \frac{D_u}{0.290 C} \quad [4.56]$$

Όπου:

D_u = η απορροφηθείσα δόση στον χρόνο t, σε Mrad

C = η συγκέντρωση του ^{238}U σε g/g.

Η θερμοφωταύγεια σε ένα δείγμα με έντονη ραδιενέργεια και πολύ μεγάλης σχετική ηλικίας σαν συνάρτηση της δόσης παρουσιάζει συνήθως φαινόμενα κόρου. Ο κόρος στα περισσότερα υλικά αρχίζει γενικά από δόσεις της τάξης του 1 Mrad. Αυτό συνεπάγεται, ότι τα δείγματα που έχουν δεχθεί αυτή την δόση (την δόση κόρου) ή και μεγαλύτερες δόσεις δεν μπορούν να χρονολογηθούν.

Η θερμοφωταύγεια έχει εφαρμοστεί με επιτυχία για χρονολογήσεις στην αρχαιολογία (πήλινα αγγεία κ.λπ) και στην γεωλογία (λάβα) και επίσης για την μελέτη της θερμικής ιστορίας δειγμάτων.

4.14. ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΠΙΝ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟΥ (ESR)

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί μια νέα μέθοδος χρονολόγησης που στηρίζεται στο φαινόμενο του συντονισμού του σπιν του ηλεκτρονίου, (ESR=ElectronSpinResonance). Η μέθοδος αυτή είναι ουσιαστικά ίδια με τη μέθοδο της θερμοφωταύγειας. Παγιδευμένα ηλεκτρόνια και οπές παράγονται σε αρχαιολογικά υλικά από την έκθεση τους σε ακτινοβολίες των φυσικών ραδιενεργών, (του περιβάλλοντος) π.χ. ουρανίου, θορίου και καλίου-40. Η θερμοφωταύγεια παρατηρείται, όπως λέχθηκε στην παράγραφο 5.13 όταν παγιδευμένα ηλεκτρόνια (ή οπές) επανασυνδέονται με οπές (ή ηλεκτρόνια). Η μέθοδος συντονισμού του σπιν του ηλεκτρονίου (ESR) συνίσταται στην παρατήρηση των παγίδων με απορρόφηση φωτονίων μικροκυμάτων από το μόριο του υλικού σε ισχυρό μαγνητικό πεδίο.

Σ' ένα μόριο τα ηλεκτρόνια τείνουν να ζευγαρωθούν με τα σπιν τους προσανατολισμένα σε αντίθετες κατευθύνσεις, έτσι ώστε το μόριο να μην εμφανίζει μαγνητική ροπή. Όπως στην περίπτωση που υφίσταται αζευγάρωτο ηλεκτρόνιο, π.χ. σε ελεύθερες ρίζες, το σύστημα συμπεριφέρεται σαν ένας μικρός μαγνήτης. Κάθε ένα από τα αζευγάρωτα ηλεκτρόνια έχει σπιν s (σε μονάδες \hbar) και μαγνητική ροπή:

$$\vec{\mu} = -g \cdot \beta \cdot \vec{s} \quad [4.57]$$

Όπου:

β είναι η μαγνητόνη του Bohr ($\beta = 0.5788 \times 10^{-14} \text{MeV/Gauss}$)

g ο παράγοντας διαχωρισμού των φασματικών γραμμών η παράγοντας Lande

Η ενέργεια E που συνδέεται με την μαγνητική ροπή όταν αυτή υφίσταται τη δράση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου H , δίνεται από την σχέση:

$$E = -\vec{\mu} \cdot \vec{H} = g \cdot \beta \cdot \overline{m_s} \cdot \vec{H} \quad [4.58]$$

Όπου:

$\overline{m_s}$ η προβολή του \vec{s} επί του \vec{H} . Το m_s μπορεί να έχει δύο τιμές $\pm 1/2$.

Έτσι έχουμε:

$$dE = g \cdot \beta \cdot H \cdot \delta m_s \quad [4.59]$$

Όπου:

$$\delta m_s = \frac{1}{2} - \left(-\frac{1}{2}\right) = 1 \quad [4.60]$$

και συνεπώς,

$$dE = g \cdot \beta \cdot H \quad [4.61]$$

Εφαρμόζοντας ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ($h\nu$), της οποίας το μαγνητικό διάνυσμα είναι κάθετο προς το πεδίο H , θα λάβει χώρα ενεργειακή μετάπτωση μεταξύ των δύο ενεργειακών σταθμών της $m_s = +1/2$ και της $m_s = -1/2$. Η ενέργεια του απορροφούμενου τότε φωτονίου είναι:

$$h\nu = g \cdot \beta \cdot H \quad [2.62]$$

Η στατιστική Boltzmann καθορίζει ότι τα αζευγάρωτα ηλεκτρόνια κατανέμονται μεταξύ των δύο ενεργειακών σταθμών με τη χαμηλότερη ($m_s = -1/2$) να παρουσιάζει μεγαλύτερο πληθυσμό (πυκνότητα). Όταν υφίσταται η συνθήκη συντονισμού του σπιν, $h\nu = g \cdot \beta \cdot H$ (απορρόφηση φωτονίου), περισσότερα ηλεκτρόνια κινούνται προς τις υψηλότερες ενεργειακές καταστάσεις παρά προς τα κάτω. Σε κάθε μια απ' αυτές τις μετακινήσεις που περιλαμβάνει ενεργειακή διαφορά $h\nu$, το αποτέλεσμα είναι το δείγμα να απορροφά ενέργεια από την συνθήκη συντονισμού, π.χ. Εάν $H = 3400 \text{ Gauss}$ και για τις τιμές $g = 2.0036$ και $\beta = 0.5788 \times 10^{-14} \text{MeV/Gauss}$, $h\nu = 3943 \times 10^{-14} \text{MeV}$ και $\nu = 9.5 \text{ GHz}$ (συχνότητα συντονισμού) στην περιοχή των μικροκυμάτων.

Με την μέθοδο του συντονισμού του σπιν του ηλεκτρονίου (ESR) μπορεί κανείς να μετρήσει την συγκέντρωση των παγίδων που περιέχουν ένα αζευγάρωτο ηλεκτρόνιο χωρίς να αδειάσει τις παγίδες. Μπορεί ακόμη να μελετήσει την αύξηση του αριθμού των παγίδων που παράγονται με τεχνητή ακτινοβόληση. Έτσι η δόση από την ακτινοβόληση από το φυσικό

περιβάλλον (φυσική δόση) μπορεί να υπολογισθεί (εκτιμηθεί) με εντελώς όμοια μέθοδο όπως και στην ραδιοχρονολόγηση με θερμοφωταύγεια.

Ο ελάχιστος αριθμός ατελειών που μπορεί κανείς να μετρήσει με την μέθοδο συντονισμού του σπίν του ηλεκτρονίου (ESR) είναι περίπου 10^{10} σπιν/Gauss. Πολύ καθαροί ασβεστίτες για τους οποίους η δόση έκθεσης σε φυσικό περιβάλλον είναι μικρότερη από 10 rad δύσκολα μπορούν να μετρηθούν. Η δόση αυτή αντιστοιχεί σε ηλικία από 500-1000 έτη. Η μεγαλύτερη ηλικία που έχει μετρηθεί με την μέθοδο ESR είναι περίπου ένα εκατομμύριο έτη, και σχετίζεται με τους σταλαγμίτες που συνδέονται με ίχνη φωτιάς στο δάπεδο του σπηλαίου των Πετραλώνων Χαλκιδικής. Παράλληλος έλεγχος της μεθόδου αυτής με τη μέθοδο της θερμοφωταύγειας έδειξε να είναι σε καλή συμφωνία. Συγκρίσεις της μεθόδου έχουν γίνει και με την μέθοδο του άνθρακα-14 και την μέθοδο ουρανίου.

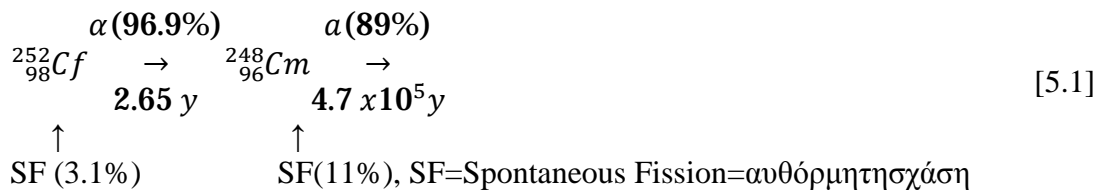
5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΡΑΔΙΟΙΣΟΤΟΠΩΝ ΣΤΗΝ ΓΕΩΛΟΓΙΑ

5.1. ΈΡΕΥΝΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΕΥΡΕΣΗ ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΟΡΥΚΤΩΝ

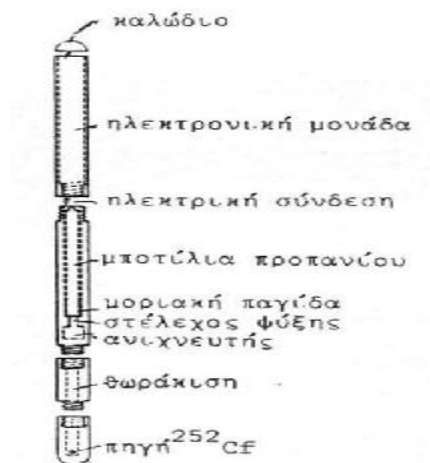
Η αρχή που χρησιμοποιείται είναι η ανίχνευση των ακτινοβολιών του υπό αναζήτηση στοιχείου αν είναι φυσικό ραδιενεργό, ή αν είναι σταθερό, εφαρμόζεται η ίδια μέθοδος αλλά αφού το στοιχείο ενεργοποιηθεί με νετρόνια.

Για ουράνιο (κυρίως) και θόριο ένας ανιχνευτής ακτινών γ βυθίζεται σε διάφορα βάθη και το ενεργειακό φάσμα μελετάται για να διαπιστωθεί η ύπαρξη ή μη των χαρακτηριστικών γ των διαφόρων ισοτόπων που συνιστούν τις ραδιενεργές σειρές των δύο αυτών στοιχείων.

Η όλη διαδικασία μπορεί να γίνει σε δύο στάδια, είτε με δειγματοληψία στο πεδίο και ενεργοποίηση (ακτινοβόληση των δειγμάτων) σε αντιδραστήρα, σε γνωστή ροή θερμικών νετρονίων Φ ($n/cm^2 \cdot sec$) και στη συνέχεια μέτρηση της ενεργότητας των δειγμάτων με απεριθμητική διάταξη π.χ. γάμμα φασματοσκοπίας, είτε απ' ευθείας π.χ. με γεωτρύπανο που περιλαμβάνει πηγή νετρονίων $^{252}_{98}Cf$, ραδιενεργό ισότοπο αυθόρμητης σχάσης (3.1%) τόσο αυτό όσο και το θυγατρικό του $^{248}_{96}Cm$ (11%), Σχήμα 14.



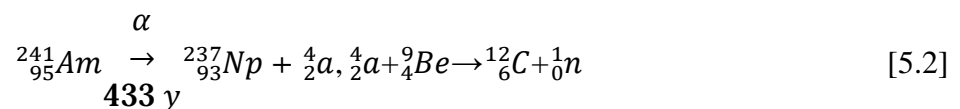
Η πηγή αυτή παρέχει τα νετρόνια που απαιτούνται για την ενεργοποίηση του ^{238}U και ^{232}Th και την επί τόπου μέτρηση (insitu) της επαγόμενης ραδιενέργειας με απ' ευθείας συνδεδεμένο σύστημα απαρίθμησης.



Σχήμα 14: Κάθετη τομή γεωτρύπανου. Η διάμετρος του είναι 7.30 cm και το μήκος του είναι περίπου 1.7m.

Για στοιχεία με σταθερά ισότοπα, μια πηγή νετρονίων Am-Be* ή $^{252}_{Cf}$ βυθίζεται στο έδαφος και διατηρείται στο ίδιο βάθος για αρκετή ώρα ώστε η ενεργότητα του ενεργοποιημένου ισότοπου να φθάσει σε μετρήσιμη τιμή. Αποσύρεται τότε η πηγή και στην ίδια θέση βυθίζεται ανιχνευτής (ακτίνων γ), ο προορισμός του οποίου είναι να διαπιστώσει την ύπαρξη των χαρακτηριστικών γ του θυγατρικού ισότοπου. Οι μετρούμενες γ θα προέρχονται από διάφορα ενεργοποιημένα ισότοπα και γι' αυτό η πτώση της ενεργότητας (ρυθμού) πρέπει να παρακολουθηθεί για αρκετό χρόνο, ώστε να είναι δυνατή η ανάλυση σε συνιστώσες ανάμεσα στις οποίες μπορεί να υπάρχει και η ζητούμενη και στη συνέχεια η ταυτοποίηση με το υπό αναζήτηση ισότοπο.

*Πηγή νετρονίων $^{241}_{Am-Be}$:



Ένα πιο τέλειο σύστημα αποτελείται από μια πηγή νετρονίων και ένα ανιχνευτή (ακτίνων γ) σπινθηριστή NaI(Tl) ή απαριθμητή Ge-Li, που βυθίζονται ταυτόχρονα στο ίδιο βάθος, Σχήμα 8.1. Ο ανιχνευτής αυτός έχει αμελητέα ευαισθησία στα νετρόνια ενώ είναι ιδανικός για την καταμέτρηση των ακτίνων γ από ενεργοποιημένα ισότοπα. Για την ανεύρεση πετρελαίου, για παράδειγμα, καταμετρούνται οι ακτίνες γ με ενέργεια 2.2 MeV που παράγονται από την αντίδραση H(n, γ) D (δευτέριο).

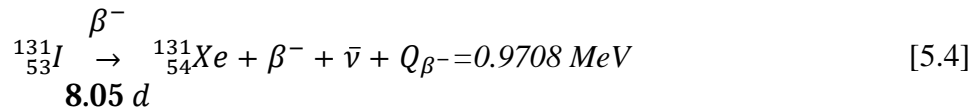


Η ίδια αντίδραση προδίδει την ύπαρξη νερού. Και στις δύο περιπτώσεις, το σύστημα μπορεί να βαθμολογηθεί ώστε ο ρυθμός κρούσεων να ερμηνεύεται σε συγκέντρωση πετρελαίου ή νερού στο γεωλογικό στρώμα. Οι μέθοδοι αυτές είναι πιο ευαίσθητες, πιο εύχρηστες και πιο ταχείες από την χημική ανάλυση. Σήμερα η έρευνα γίνεται επί τόπου (insitu) με φορητά συστήματα ανίχνευσης και απαρίθμησης με τα οποία είναι εφοδιασμένα τα συνεργεία γεωτρήσεων.

5.2. ΙΧΝΗΘΕΤΕΣ

Ιχνηθέτες είναι ραδιενεργά ισότοπα, σε πολύ μικρές ποσότητες, που προσθέτονται σε σώματα των οποίων την κίνηση θέλουμε να παρακολουθήσουμε. Για παράδειγμα, η κίνηση του υπόγειου νερού για μικρά χρονικά διαστήματα μπορεί να μελετηθεί εύκολα με την προσθήκη σ' ένα σημείο μικρής ποσότητας $^{131}_I$. Αν σ' ένα άλλο σημείο το νερό βρεθεί να περιέχει ραδιενεργό ιώδιο μετά από ένα χρονικό διάστημα, τότε δύο συμπεράσματα ακολουθούν: Πρώτον ότι το νερό προέρχεται από το σημείο όπου έγινε η πρόσθεση του ιχνηθέτη, και δεύτερον ότι ο χρόνος που χρειάστηκε το νερό για να φτάσει στο σημείο της μέτρησης είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ τοποθέτησης του ιχνηθέτη και της στιγμής που η ενεργότητα του νερού στο δεύτερο σημείο έφθασε σε μέγιστη τιμή.

Η εκλογή του ιχνηθέτη εξαρτάται από τις συνθήκες του υπό μελέτη προβλήματος. Στο πιο πάνω παράδειγμα, το $^{131}_I$ εκπέμπει ακτινοβολίες β^- και γ (με ενέργεια 364 keV) και έχει ημιζωή 8.05 ημέρες. Το σχήμα διάσπασης του $^{131}_I$ έχει ως εξής:



Οι γάμμα που εκπέμπονται από τις αποδιεγέρσεις των πυρήνων ${}^{131}\text{Xe}$ είναι με ενέργειες 80 keV (2.6%), 284 keV (5.4%), 364 keV (82%), 637 keV (6.8%) και 723 keV (1.6%). Η παρακολούθηση του ${}^{131}\text{I}$ μπορεί να γίνει συνεπώς με σύστημα β^- ή γ απαρίθμησης. Η χρήση του λοιπόν είναι δυνατή όταν δεν υπάρχει πιθανότητα να μολύνει νερό που θα χρησιμοποιηθεί σε διάστημα μερικών ημερών. Επίσης δεν θα χρησιμοποιηθούν ιχνηθέτες που είναι δυνατό να χαθούν αντιδρώντας χημικά με το υπέδαφος.

Η μελέτη της κίνησης της ιλύος των ποταμών είναι ένα τυπικό παράδειγμα. Σ' αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται ραδιενεργό γυαλί ή σκόνη με κόκκους των ιδίων διαστάσεων με αυτούς της ιλύος. Παρόμοια προβλήματα συναντά κανείς σε μελέτες σχετικά με τη ρύπανση του περιβάλλοντος.

Τυπική περίπτωση της χρησιμότητας των ιχνηθετών είναι το «σύνδρομο της Κίνας». Τα ραδιενεργά που διέφυγαν από πυρηνικό ατύχημα που συνέβη στις ΗΠΑ (π.χ. το ατύχημα του Three Mile Island, στις 28 Μαρτίου 1979) έφτασαν υπογείως και έκαναν την εμφάνιση τους (διαπιστώθηκαν) στην Κίνα που απέχει μερικές χιλιάδες μίλια, και δεν ήταν δυνατό έτσι να αποκρύψουν ένα πυρηνικό ατύχημα.

5.3. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΛΑΙΟΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΜΕ ${}^{18}\text{O}$

Από τα ενδιαφέροντα προβλήματα της παλαιοκλιματολογίας, παλαιοντολογίας και κατ' επέκταση της γεωλογίας είναι ο προσδιορισμός των θερμοκρασιών των θαλασσών στους προϊστορικούς χρόνους. Σαν τυπικό παράδειγμα προσπάθειας τέτοιων προσδιορισμών είναι η μέθοδος που αρχικά προτάθηκε από τον Urey, για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας των θαλασσών με βάση την περιεκτικότητα σε οξυγόνο-18 στα κελύφη οστράκων των απολιθωμάτων. Η μέθοδος έχει ως ακολούθως:

Είναι γνωστό ότι ισότοπα δεδομένου στοιχείου μπορεί να αναλογούν σε δεδομένη χημική σύνθεση μέχρι τη δημιουργία κάποιας δυναμικής ισορροπίας. Το μέτρο ισορροπίας, όπως κάθε χημική αντίδραση, είναι συναρτήση και της θερμοκρασίας.

Στην περίπτωση μας εκείνο που μας ενδιαφέρει είναι η ανταλλαγή του οξυγόνου του νερού, H_2O (π.χ. που περιβάλλει ένα όστρακο) και του οξυγόνου του ανθρακικού ασβεστίου των οστράκων, CaCO_3 .

Το οξυγόνο στην φύση έχει κατά κυρίότητα δυο σταθερά ισότοπα, ${}^{16}\text{O}$ (99.76%) και ${}^{18}\text{O}$ (0.204%). Από χημικής πλευράς η μόνη διαφορά μεταξύ τους είναι στην μάζα και κατά συνέπεια στην ευκινησία στη διάχυση. Τα πειράματα έδειξαν πως εάν το ανθρακικό ασβέστιο σχηματισθεί στους μηδέν βαθμούς είναι πλουσιότερο σε ${}^{18}\text{O}$ απ' ότι το νερό, κατά ένα παράγοντα 1.026, ενώ στους 25°C ο παράγοντας αυτός είναι 1.022. Η όλη μέθοδος στηρίζεται στη μικρή αυτή διαφορά στην περιεκτικότητα σε ${}^{18}\text{O}$ κατά τη θερμοκρασία σχηματισμού των κελυφών. Η διαφορά είναι μικρή αλλά μετρήσιμη με φασματογράφο μάζας καθόσον τα όργανα αυτά σήμερα μπορούν να προσδιορίσουν την ισοτοπική σύσταση με ακρίβεια στο πέμπτο δεκαδικό ψηφίο. Στην πράξη γίνεται βαθμολόγηση με το περιεχόμενο σε ${}^{18}\text{O}$ του CaCO_3 των οστράκων από θάλασσες διαφόρων θερμοκρασιών.

Με τη μέθοδο αυτή έχουν βρεθεί-μελετηθεί αλλαγές στο μέσο κλίμα περιοχών (θαλασσών) και γενικά δίνουν μια ιδέα στις αλλαγές του μέσου κλίματος της γης τα τελευταία 150 εκατομμύρια χρόνια.

5.4. ΤΟ ΡΑΔΟΝΙΟ ΣΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ

Το $^{222}_{Rn}$ ως γνωστό είναι αέριο ραδιενεργό ισότοπο της σειράς Ουρανίου-ραδίου, θυγατρικό του $^{226}_{Ra}$, με χρόνο ημισείας ζωής 3.8235 days. Ένα άλλο ραδιενεργό ισότοπο του ραδονίου, το $^{220}_{Rn}$ (Th, thoron=θορόνιο), προέρχεται από τη σειρά του θορίου, είναι πάρα πολύ βραχύβιο, έχει χρόνο ημισείας ζωής 55.6 sec.

Εδώ και μια δεκαετία, είχαν παρατηρηθεί μεταβολές (ανωμαλίες) στην εκπομπή του ραδονίου που αναβλύζει από τα νερά της γής όπως π.χ. το νερό των φρεάτων (πηγαδιών) και των πηγών. Στη Σοβιετική Ένωση επιστήμονες παρατήρησαν μια ασυνήθιστη, ωστόσο μη κανονική αύξηση της συγκέντρωσης του ραδονίου στα νερά της γής, στην Τασκένδη, πριν από το σεισμό της $^{26}^{N}$ Απριλίου 1966. Η συγκέντρωση του ραδονίου σε πολλά βαθιά πηγάδια που προέρχονταν από βάθος 1200-1400m, στην Τασκένδη, άξανε βαθμιαία για αρκετά χρόνια, έφθασε σε μια μέγιστη στάθμη ακριβώς λίγο πριν από το σεισμό μεγέθους 5.5 της κλίμακας Richter και ήταν 2-3 φορές υψηλότερη από την κανονική τιμή της τάξης των περίπου $5 \times 10^{-10} \text{Ci/l}$ (500 pCi/l). Αμέσως μετά τον σεισμό η συγκέντρωση του ραδονίου επανήλθε στα φυσιολογικά της όρια.

Στην Κίνα, από το 1968, υδρογεωχημικές μελέτες πάνω στην πρόβλεψη των σεισμών ερμήνευσαν με το μηχανισμό γενέσεως των σεισμών*, την παρατήρηση μεταβολών στη συγκέντρωση του ραδονίου στα νερά της γής. Μετρήσεις του ραδονίου έπαιξαν σπουδαίο ρόλο στην επιτυχή πρόβλεψη του σεισμού μεγέθους 7.3 στη χερσόνησο Liaotung της Κίνας που έλαβε χώρα στις 4 Φεβρουαρίου 1975.

Για να ερμηνευτεί το φαινόμενο της αύξησης της συγκέντρωσης του ραδονίου πριν από τον σεισμό, χρησιμοποιείται συχνά το πρότυπο της διαστολής των πετρωμάτων (rock dilatation) και της διάχυσης του ύδατος. Ο όλος μηχανισμός του φαινομένου της μεταβολής της εκπομπής του ραδονίου δεν έχει αποσαφηνισθεί ικανοποιητικά.

Για τη μέτρηση του διαχεομένου ραδονίου αυτές απαιτείται τεχνολογία, η λεγόμενη του χαμηλού υποστρώματος (low-level), καθόσον το ραδόνιο στα νερά της γής είναι σε συγκεντρώσεις της τάξης των 10^{-10}Ci/l (100 pCi/l) (αντιπροσωπευτική συγκέντρωση) και κάτω. Το $^{222}_{Rn}$ στη γη (έδαφος) μετράται συνήθως με πλαστικούς ανιχνευτές ιχνών της άλφα ακτινοβολίας, (το $^{222}_{Rn}$ είναι α-ραδιενεργό) καθώς και με την μέθοδο ενεργού άνθρακα (προσρόφηση) ενώ στο νερό των πηγαδιών μετράται με την γάμμα φασματοσκοπία. Οι ανιχνευτές βυθίζονται στο έδαφος μέχρι περίπου τα 60 cm και μετράται το $^{222}_{Rn}$. Το $^{220}_{Rn}$, θορόνιο, λόγω του μικρού χρόνου ημισείας ζωής, 56 sec, δεν θα προφτάσει να διανύσει μεγάλη απόσταση από το σημείο γενέσεως του και δεν θα ανιχνευθεί, αν λάβει υπόψη του κανείς ότι τα άλφα του ραδονίου και του θορονίου δεν διανύουν απόσταση πάνω από 5-6 cm που είναι η εμβέλεια τους στον αέρα. Απ' εναντίας το $^{222}_{Rn}$ λόγω του μεγάλου χρόνου ημισείας ζωής ≈ 3.82 days, διανύει μεγάλες αποστάσεις πριν διασπασθεί και ως εκ τούτου εύκολα ανιχνεύεται.

Η συγκέντρωση C του ραδονίου σε βάθος x στη γη, εξαρτάται από τον συντελεστή διαχύσεως D του ραδονίου στο μέσο (π.χ. στη γη), από τον ρυθμό παραγωγής R του ραδονίου στον χώρο που καταλαμβάνουν οι πόροι και από την σταθερά διάσπασης του, $\lambda = 2.1 \times 10^{-6} \text{sec}^{-1}$ ($T_{1/2} = 3.823 \text{ days}$). Δίνεται από τη σχέση:

$$C = \frac{R}{\lambda} (1 - e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D}} \cdot x}) \quad \text{Ci/l} \quad [5.5]$$

Που είναι λύση της διαφορικής εξίσωσης διαχύσεως:

$$D \cdot \frac{d^2 C}{dx^2} - \lambda C + R = 0 \quad [5.6]$$

Όπου:

x σε cm,

C σε Ci/l

R σε Ci/l·sec

Αν ληφθεί υπόψη και το πορώδες της γης, ρ , και η ταχύτητα ροής του ραδονίου, v (κάθετη συνιστώσα) εντός του χώρου των πόρων, τότε η σχέση [5.5] γίνεται:

$$C = \frac{R}{\lambda} \left[1 - e^{\left(\frac{v}{2D\rho} - \sqrt{\frac{v^2}{4D^2\rho^2} + \frac{\lambda}{D}} \right) x} \right] \quad [5.6.]$$

Για τυπικές τιμές των παραμέτρων $D=0.03 \text{ cm}^2/\text{sec}$ και $\rho=0.25$ (πορώδες 25%), η μέγιστη αύξηση στη συγκέντρωση του ραδονίου σε βάθος 60 cm και ανοδική ροή είναι κατά παράγοντα 2.5. Στο βάθος των 60 cm ανοδική ροή του ραδονίου με ταχύτητα $v=10^{-5} \text{ cm/sec}$ (8.6 mm/d) επιφέρει 6% αύξηση στη συγκέντρωση του ραδονίου, ενώ ροή με ταχύτητα 10 φορές μεγαλύτερη παράγει αύξηση κατά 64%. Σε μεγαλύτερα βάθη η ευαισθησία της μεθόδου μικραίνει. Θα πρέπει να τονισθεί ότι ο συντελεστής διαχύσεως άρα και η συγκέντρωση του ραδονίου εξαρτάται από μετεωρολογικές παραμέτρους όπως π.χ. η θερμοκρασία, η υγρασία κ.λπ. Όταν η θερμοκρασία του εδάφους είναι υψηλή (θερινή περίοδος) τότε λόγω διαστολής των πετρωμάτων τα ρήγματα (cracks) μεγαλώνουν και η ροή του ραδονίου αυξάνει. Αντίθετα κατά την περίοδο πολλών βροχών (φθινοπωρινή περίοδος) οι πόροι του εδάφους κλείνουν και η ροή του ραδονίου μειώνεται.

Σήμερα αναπτύσσονται ευρέως συστήματα μέτρησης του ραδονίου συνεχούς λειτουργίας και καταγραφής (Continuous Radon Monitors) για την παρακολούθηση των μεταβολών στη συγκέντρωση του ραδονίου που αναβλύζει από τη γη. Η μέθοδος του ραδονίου εκτός του ότι είναι ένα μέσο πρόβλεψης των σεισμών, ταυτόχρονα δίνει σαν πρόσθετη πληροφορία την παρουσία του ουρανίου σε ουρανιούχα ορυκτά κάτω από την επιφάνεια της γης στην ευρύτερη περιοχή των σεισμών.

6. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΑΦΕΤΗΡΙΑ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

6.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είδαμε ότι, κατά την αλληλεπίδραση ραδιενεργών ακτινοβολιών και ύλης, η ακτινοβολία εναποθέτει ενέργεια στο υλικό, με αποτέλεσμα τον ιονισμό του υλικού. Είναι ακριβώς αυτή η εναπόθεση ενέργειας, ο ιονισμός των μορίων των κυττάρων, που αποτελεί την αφετηρία των βιολογικών επιπτώσεων των ραδιενεργών ακτινοβολιών σε ζωντανούς οργανισμούς.

Η ακριβής περιγραφή της εξαιρετικά περίπλοκης δομής του κυττάρου δεν εντάσσεται στο σκοπό αυτού του βιβλίου. Για την κατανόηση των βιολογικών επιπτώσεων θα δοθεί εδώ στοιχειώδεις περιγραφή της δομής και λειτουργίας του κυττάρου. Διακρίνονται δύο κατηγορίες κυττάρων: τα **σωματικά κύτταρα**, που συγκροτούν όλα τα όργανα του οργανισμού αποτελώντας έτσι τη μέγιστη πλειονότητα των κυττάρων (ο αριθμός τους στον ενήλικα άνθρωπο είναι της τάξης του 10^{13} , δηλαδή 10 επί 1 εκατομμύριο επί ένα εκατομμύριο), και τα **γαμετοκύτταρα**, δηλαδή τα κύτταρα αναπαραγωγής, που ονομάζονται και γεμάτες: τα **ωάρια** και τα **σπερματοζωάρια**. Οι γεμάτες παράγονται στους γενετικούς αδένες των θηλέων και αρρένων ατόμων: τις ωοθήκες και τους όρχεις. Από την ένωση ενός ωαρίου και ενός σπερματοζωαρίου δημιουργείται το **γονιμοποιημένο ωάριο**, το πρώτο κύτταρο του νέου οργανισμού, από το οποίο προκύπτουν με διαδοχικούς αναδιπλασιασμούς, που ονομάζονται **μιτώσεις**, τα δισεκατομμύρια κύτταρα που αποτελούν τον ώριμο νέο οργανισμό.

Κάθε κύτταρο αποτελείται από μικρά ανόργανα χημικά μόρια, όπως μόρια ύδατος(περίπου το 85% του ολικού όγκου),έως και πολύ μεγάλα οργανικά μόρια, όπως πρωτεΐνες και νουκλεϊνικά οξέα.

Οι πρωτεΐνες αποτελούνται από μικρές δομικές μονάδες ενωμένες μεταξύ των. Σε κάθε κύτταρο δημιουργούνται πολλαπλά μόρια από δεκάδες χιλιάδες είδη πρωτεϊνών ,εκ των οποίων κάθε είδος διαφέρει από το άλλο στον αριθμό και στην αλληλουχία των δομικών μονάδων που αποτελούν τα μόρια του. Οι πρωτεΐνες έχουν ουσιαστική συνεισφορά στην δομή και τη λειτουργία του κάθε κυττάρου δομή, αλλά και η λειτουργία των κυττάρων πραγματοποιείται κυρίως με την ύπαρξη **μεμβρανών** που περιέχουν ειδικά είδη πρωτεϊνών. Η εξωτερική μεμβράνη περιβάλλει το κύτταρο και τα υποκυτταρικά οργανίδια που περιέχουν στη δομή τους εξειδικευμένες πρωτεΐνες. Κάποια από αυτά τα οργανίδια παράγουν τα μόρια που μεταφέρουν χημική ενέργεια, όπου αυτή είναι αναγκαία για το κύτταρο ,ενώ σε άλλα γίνεται σύνθεση των μορίων των πρωτεϊνών, που είναι αναγκαία για την επιβίωση των κυττάρων καθώς και άλλων πρωτεϊνών που συνεισφέρουν στην επιτέλεση των διαφόρων χημικών αντιδράσεων, που είναι επίσης αναγκαίες για την επιβίωση και τον αναδιπλασιασμό των κυττάρων.

Τα νουκλεϊνικά οξέα αποτελούνται επίσης από μικρά χημικά μόρια που ονομάζονται νουκλεοτίδια και είναι ενωμένα μεταξύ τους σε μορφή αλυσίδας. Από τα νουκλεϊνικά οξέα το σπουδαιότερο είναι το ονομαζόμενο **DNA**, που αποτελεί το πληροφορικό υλικό του κυττάρου. Η αλληλουχία των εκατομμυρίων νουκλεοτιδίων ,που αποτελούν μόρια του DNA, εμπεριέχει τις αναγκαίες πληροφορίες που είναι απαραίτητες για την δομή και λειτουργία του

κάθε κυττάρου, αλλά και ολόκληρου του οργανισμού. Οι πληροφορίες που ενυπάρχουν στο DNA υλοποιούνται με την κατευθυνόμενη από το DNA σύνθεση των πρωτεϊνών. Για κάθε συγκεκριμένο είδος πρωτεΐνης υπάρχουν συγκεκριμένες περιοχές στο DNA ,που ονομάζονται **γονίδια**. Τα μόρια του DNA είναι συγκεκριμένα στο κέντρο κάθε κυττάρου ,τον πυρήνα του, ώστε να προστατεύεται κατά το δυνατόν το πληροφοριακό υλικό του κυττάρου ,δηλαδή τα γονίδια, από τις επιδράσεις του περιβάλλοντος.

Σε αντίθεση με τα μόρια των πρωτεϊνών, όπου για κάθε είδος πρωτεΐνης υπάρχουν πολλαπλά αντίτυπα μέσα σε κάθε κύτταρο, στην περίπτωση του DNA υπάρχουν μόνο δύο αντίτυπα για κάθε αλληλουχία νουκλεοτιδίων που απαρτίζουν μόρια DNA.

Αλλοιώσεις που επάγονται σε μικρό αριθμό μορίων ενός είδους πρωτεΐνης δεν επηρεάζουν τη δομή και λειτουργία του κυττάρου, γιατί υπάρχει μεγάλος αριθμός από όμοια για κάθε είδος πρωτεΐνης δεν επηρεάζουν τη δομή και λειτουργία του κυττάρου ,γιατί υπάρχει μεγάλος αριθμός από μόρια για κάθε είδος πρωτεΐνης. Αλλά αλλοιώσεις που επισυμβαίνουν στα μόρια του DNA μπορεί να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στη δομή και λειτουργία του κάθε κυττάρου, αφού από κάθε είδος αλληλουχίας νουκλεοτιδίων που απαρτίζουν μόρια DNA υπάρχουν μόνο δύο μόρια. Οι αλλοιώσεις, βλάβες, που επάγονται στο DNA καταστρέφουν το πληροφοριακό υλικό του κυττάρου που, όπως είπαμε παραπάνω, είναι αναγκαίο για την σύνθεση των πρωτεϊνών, που με την σειρά τους είναι αναγκαίες για την δομή του και την λειτουργία του. Κάθε αλλοίωση γονιδίου, κάθε βλάβη που επάγεται στο DNA ενός κυττάρου μπορεί να οδηγήσει, λόγω καταστροφής συγκεκριμένης πληροφορίας, στην αδυναμία σύνθεσης, μέσα στο κύτταρο αυτό, συγκεκριμένου είδους πρωτεΐνης ή στην σύνθεση του συγκεκριμένου είδους πρωτεΐνης με διαφοροποιημένη λειτουργικότητα. Οι αλλοιώσεις αυτές, που μεταβιβάζονται και στα θυγατρικά κύτταρα, ονομάζονται **μεταλλάξεις** και εκτός σπανιότατων περιπτώσεων είναι δυσμενείς τόσο για το κύτταρο, στο οποίο συμβαίνουν, όσο και για τα θυγατρικά του.

Κατά την μεταξύ των μιτώσεων περίοδο των κυττάρων, που ονομάζεται και στάδιο σύνθεσης, το DNA των κυττάρων βρίσκεται υπό τη μορφή της **χρωματίνης**, που αποτελείται από τα μόρια του DNA και από μόρια εξειδικευμένων πρωτεϊνών. Κυρίως κατά το στάδιο αυτό συντίθενται στο κύτταρο τα μόρια των διαφόρων ειδών πρωτεϊνών. Κατά το στάδιο αυτό γίνεται και ο αναδιπλασιασμός των μορίων του DNA. Κατά τη διάρκεια της **μίτωσης** ενός κυττάρου προς δημιουργία των δύο θυγατρικών του κυττάρων (με τον αναδιπλασιασμό των οποίων αργότερα θα δημιουργηθούν τέσσερα θυγατρικά κύτταρα κ.ο.κ.) τα αναδιπλασιασμένα μόρια του DNA εμφανίζονται με τη μορφή των χρωματίδων. Ανά δύο οι χρωματίδες που περιέχουν ακριβώς τα ίδια γονίδια, παρουσιάζονται ενωμένες και αποτελούν ένα **χρωματόσωμα**.

Σε κάθε σωματικό κύτταρο του ανθρώπου υπάρχουν 23 ζεύγη χρωματοσωμάτων ,δηλαδή 46 χρωματοσώματα ,τα οποία ανά δύο,(αυτά που αποτελούν ένα ζεύγος)είναι όμοια μεταξύ τους (με την εξαίρεση ενός ζεύγους, του ζεύγους των φυλοκαθοριστικών χρωματοσωμάτων, που καθορίζουν το φύλο στον άνθρωπο), δηλαδή περιέχουν όμοια είδη γονιδίων. Ένα χρωματόσωμα από τα δύο χρωματοσώματα κάθε ζεύγους χρωματοσωμάτων (δηλαδή σύνολο 23 χρωματοσώματα) προέρχονται από τον άλλο γονέα. Κατά την διάρκεια κάθε μίτωσης (συμπεριλαμβανομένης και της πρώτης μίτωσης ενός νέου οργανισμού, της μίτωσης του γονιμοποιημένου ωαρίου), δηλαδή κάθε αναδιπλασιασμό ενός κυττάρου προς δημιουργία δύο θυγατρικών κυττάρων, κάθε μία από τις δύο χρωματίδες καθενός από τα 46 χρωματοσώματα εισέρχεται σε ένα από τα δύο θυγατρικά κύτταρα. Με τον τρόπο αυτό κάθε θυγατρικό παραλαμβάνει από 46 χρωματίδες που είναι ίδιες με τις 46 χρωματίδες (δηλαδή 23 ζεύγη χρωματίδων) που παραλαμβάνει το άλλο θυγατρικό κύτταρο. Δηλαδή κάθε θυγατρικό σωματικό κύτταρο περιέχει τα ίδια μόρια DNA, τα ίδια γονίδια, τις ίδιες πληροφορίες που περιέχει το άλλο θυγατρικό κύτταρο.

Αντίθετα προς τον τρόπο αναδιπλασιαμού των σωματικών κυττάρων, η δημιουργία των γαμετοκυττάρων, των ωαρίων ή των σπερματοζωαρίων, γίνεται με ένα ειδικό τρόπο αναδιπλασιασμού που απολήγει στην εμφάνιση μέσα σε κάθε ωάριο, η σπερματοζωάριο, ενός μόνο χρωματοσώματος από τα δύο κάθε ζεύγους χρωματοσωμάτων. Κάθε γαμετοκύτταρο περιέχει μόνο 23 χρωματοσώματα, τα οποία, όπως είπαμε παραπάνω, περιέχουν τα μόρια του DNA. Το γονιμοποιημένο όμως ωάριο, το αρχικό κύτταρο κάθε οργανισμού, περιέχει 46 χρωματοσώματα (23 από το ωάριο που περιέχουν DNA της μητέρας και 23 από το σπερματοζωάριο που περιέχουν DNA του πατέρα) δηλαδή 23 ζεύγη χρωματοσωμάτων. Με τις διαδοχικές μιτώσεις που επακολουθούν δημιουργούνται τα σωματικά κύτταρα του οργανισμού που περιέχουν, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, 23 ζεύγη χρωματοσωμάτων. Μεταλλάξεις, αλλοίωσης του DNA, που εμπεριέχονται σε γαμετοκύτταρα του ενός ή του άλλου γονέα είναι δυνατόν να μεταβιβασθούν στους απογόνους.

Η διαδικασία η οποία οδηγεί στην εμφάνιση των αλλοιώσεων μέσα στα κύτταρα αρχίζει με την πρακτικά ακαριαία παραγωγή των ιόντων στο κύτταρο από την εναπόθεση της ενέργειας των ραδιενεργών σωματιδίων. Τα ιόντα, σε χρόνο της τάξης του εκατομμυριοστού του δευτερολέπτου, αντιδρούν με μόρια του κυττάρου με αποτέλεσμα την παραγωγή δραστικών χημικών προϊόντων. Αυτά τα χημικά προϊόντα, σε χρόνο μερικών δευτερολέπτων, αντιδρούν με τα μόρια του κυττάρου. Από τις αντιδράσεις αυτές οι σπουδαιότερες από άποψη αποτελεσμάτων για το κύτταρο είναι αυτές που απολήγουν σε αλλοιώσεις των προϊόντων των μεμβρανών και του DNA.

Ακολουθεί τέλος το βιολογικό στάδιο των αλλοιώσεων που μπορεί να διαρκέσει από μερικά λεπτά της ώρας μέχρι δεκάδες χρόνια, ανάλογα με την επίπτωση της βλάβης. Η έκταση της επίπτωσης εξαρτάται από τον αριθμό των κυττάρων που διαταράχθηκαν και κατά συνέπεια από το μέγεθος της ακτινοβολήσης, δηλαδή από τον αριθμό των ραδιενεργών σωματιδίων ή φωτονίων που απορροφώνται και από την ενέργεια τους.

Οι αλλοιώσεις στις πρωτεΐνες των μεμβρανών οδηγούν σε καταστροφές, είτε της εξωτερικής μεμβράνης του κυττάρου είτε υποκυτταρικών οργανιδίων. Αν οι καταστροφές αυτές είναι εκτεταμένες, το κύτταρο στερείται της αναγκαίας γι' αυτό χημικής ενέργειας και αδυνατεί να συνθέσει τις αναγκαίες για την επιβίωσή του πρωτεΐνες. Το αποτέλεσμα είναι ο κυτταρικός θάνατος. Οι επιπτώσεις σε άνθρωπο που εκτέθηκε σε ραδιενέργεια και που οφείλονται σε εκτεταμένα φαινόμενα αλλοιώσεων κυτταρικών μεμβρανών ή/και κυτταρικών θανάτων ονομάζονται **άμεσες σωματικές επιπτώσεις**.

Οι αλλοιώσεις που προκαλούνται στα γονίδια που περιέχει το DNA ,δηλαδή οι μεταλλάξεις, είναι περισσότερο σημαντικές ,επειδή αφορούν σε αλλοιώσεις των πληροφοριών που φέρει το DNA. Αν η μετάλλαξη αφορά στην δημιουργία μορίων μιας πρωτεΐνης που είναι αναγκαία για την επιβίωση του κυττάρου, τότε επέρχεται ο καλούμενος γενετικός κυτταρικός θάνατος. Σε άλλες περιπτώσεις το κύτταρο, παρά την μετάλλαξη που φέρει, μπορεί να επιβιώσει με ένα ελαττωματικό τρόπο λειτουργίας, να δημιουργήσει θυγατρικά κύτταρα (μέσω ανώμαλων συνήθως μιτώσεων) και σε ορισμένες από αυτές τις περιπτώσεις να απολήξει στην εμφάνιση **καρκίνου** ή **λευχαιμίας**. Οι επιπτώσεις στον άνθρωπο που εκτέθηκε σε ραδιενέργεια και αφορούν στην εμφάνιση καρκίνου και λευχαιμιών ονομάζονται **καθυστερημένες σωματικές επιπτώσεις**.

Αν έχει επισυμβεί όμως μετάλλαξη σε γενετικά κύτταρα ,τότε αυτή ενδέχεται να μεταβιβαστεί στους απογόνους με αποτέλεσμα τις **γενετικές επιπτώσεις**, την πιθανή δηλαδή εμφάνιση στους απογόνους δυσμενών συνήθως χαρακτηριστικών ,που γενικά ονομάζονται **κληρονομικές ανωμαλίες**. Οι σωματικές και γενετικές επιπτώσεις από την έκθεση στη ραδιενέργεια θα εξετασθούν στο παρακάτω κεφάλαιο. Θα πρέπει όμως να σημειωθεί εδώ ότι μεταλλάξεις (και οι συνδεόμενοι προς αυτές καρκίνοι, λευχαιμίες και κληρονομικές ανωμαλίες) δεν επάγονται μόνον από τις ακτινοβολίες, αλλά και από χιλιάδες άλλα φυσικά ή ανθρώπινα αίτια.

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι οι βιολογικές επιπτώσεις από την έκθεση στη ραδιενέργεια είναι συνάρτηση της ποσότητας της ενέργειας που εναποτίθεται από την ακτινοβολία, άρα και του είδους του φωτονίου ή σωματιδίου. Είναι ακόμη συνάρτηση του ρυθμού εναπόθεσης ενέργειας, δηλαδή της ποσότητας ενέργειας που εναποθέτει η ακτινοβολία, άρα και του είδους του φωτονίου ή σωματιδίου. Είναι ακόμη συνάρτηση του ρυθμού εναπόθεσης ενέργειας, δηλαδή της ποσότητας ενέργειας που εναποθέτει η ακτινοβολία ανά μονάδα χρόνου, π.χ. ανά δευτερόλεπτο.

Οι δόσεις που απαιτούνται για την επαγωγή των άμεσων βιολογικών επιπτώσεων είναι κατά πολύ μεγαλύτερες (εκατοντάδες ή και χιλιάδες φορές) εκείνων που απαιτούνται για την επαγωγή των καθυστερημένων σωματικών επιπτώσεων (καρκίνος, λευχαιμία) ή των γενετικών επιπτώσεων.

Στη περίπτωση κάθε είδους άμεσης βιολογικής επίπτωσης υπάρχει κατώτερη δόση, κάτω από την οποία η συγκεκριμένη άμεση επίπτωση δεν εμφανίζεται. Αντίθετα, στην περίπτωση των καθυστερημένων σωματικών επιπτώσεων και των γενετικών επιπτώσεων θεωρείται ότι δεν υπάρχει κατώτερη δόση (κατώφλι δόσης), κάτω από την οποία δεν υπάρχει πιθανότητα να προκληθεί τέτοια επίπτωση. Η υπόθεση αυτή, ότι δηλαδή δεν υπάρχει τέτοιο κατώφλι δόσης, γίνεται δίοτι, μολονότι δεν έχουν διαπιστωθεί επιπτώσεις για πολύ μικρές δόσεις, δεν έχει αποδειχθεί και ενδεχομένως δεν μπορεί να αποδειχθεί ότι όντως η πιθανότητα επίπτωσης για δόσεις μικρότερες κάποιας τιμής είναι μηδενική. Έτσι, η θεώρηση αυτή είναι συντηρητική, είναι προς την «ασφαλή πλευρά». Το θέμα εξακολουθεί να συνιστά αντικείμενο έρευνας.

Ένα άλλο σημαντικό σημείο είναι ότι η ίδια μορφή καρκίνου, ή λευχαιμίας, ή η ίδια μορφή γενετικής επίπτωσης μπορεί να προκληθεί είτε ένας άνθρωπος εκτεθεί σε υψηλή ή χαμηλή δόση ακτινοβολίας. Ο λόγος είναι ότι και οι καρκίνοι και οι λευχαιμίες και οι γενετικές επιπτώσεις προκαλούνται από μεταλλάξεις, οι οποίες θεωρείται ότι είναι δυνατόν να συμβούν ακόμη και με μικρή δόση ακτινοβολίας. Η διαφορά αυτή από άποψη αναγκαίας δόσης μεταξύ των άμεσων επιπτώσεων αφ' ετέρου, οφείλεται στο ότι στις άμεσες επιπτώσεις απαιτείται να αλλοιωθεί μεγάλος αριθμός μορίων πρωτεϊνών από τα πολλά όμοια που υπάρχουν για κάθε είδος πρωτεΐνης (άρα απαιτούνται μεγάλες δόσεις). Στις άλλες δύο περιπτώσεις που προκαλούνται από μεταλλάξεις (αλλοιώσεις στον περιορισμένο αριθμό μορίων του DNA που υπάρχουν σε κάθε κύτταρο) ακόμη και μικρή δόση, εφόσον αλλοιώσει μόρια του DNA, θεωρείται ότι ενδέχεται να προκαλέσει αντίστοιχες επιπτώσεις.

Με βάση αυτές τις διαπιστώσεις είναι φανερό ότι είναι αναγκαίος ο ορισμός μονάδων δόσεων και θα πρέπει όμως να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι ο ανθρώπινος οργανισμός, όπως εξάλλου και κάθε οργανισμός, εξελίχθηκε στη σημερινή του μορφή με μια σειρά μεταλλάξεων μέσα σε ένα περιβάλλον φυσικής ραδιενέργειας. Το περιβάλλον αυτό έπαιξε σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη του θεωρείται βέβαιο ότι ορισμένες από τις μεταλλάξεις που συνέβαλαν στην εξέλιξη του και θεωρείται βέβαιο ότι ορισμένες από τις μεταλλάξεις, που συνέβαλαν στην εξέλιξη του ανθρώπου, προέρχονται από έκθεση των προγόνων μας στη φυσική ραδιενέργεια.

6.2. ΔΟΣΕΙΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Όταν κάποια ποσότητα ιοντίζουσας ακτινοβολίας (ραδιενεργών σωματιδίων) προσπέσει σε κάποιο υλικό, όπως ο βιολογικός ιστός, ένα μέρος της θα διέλθει δια του υλικού να αλληλεπιδράσει με αυτό και ένα άλλο μέρος της θα αλληλεπιδράσει με το υλικό εναποθέτοντας σε αυτό ενέργεια. Το υλικό θα απορροφήσει ενέργεια από τα ραδιενεργά σωματίδια, η οποία είναι σχετικά εύκολο να υπολογισθεί. Το μέγεθος που ενδιαφέρει για την

εκτίμηση των συνεπειών από τη πρόσπτωση της ραδιενεργού ακτινοβολίας σε υλικό είναι η ενέργεια που απορροφάται ανά μονάδα μάζας του υλικού και ονομάζεται **απορροφώμενη δόση**. Το ίδιο ισχύει και για την εκτίμηση ενδεχόμενων επιπτώσεων σε βιολογικούς ιστούς.

Έτσι, η απορροφώμενη δόση σε βιολογικό ιστό είναι το βασικό μέγεθος για την εκτίμηση αφ' ενός μεν της διακινδύνευσης επαγωγής βιολογικών επιπτώσεων, αφ' ετέρου δε του μεγέθους των επιπτώσεων: μεγαλύτερη απορροφώμενη δόση συνεπάγεται μεγαλύτερη διακινδύνευση και ενδεχομένως μεγαλύτερο μέγεθος επίπτωσης. Η σύγχρονη μονάδα απορροφώμενης δόσης, δηλαδή απορροφώμενης ενέργειας ανά μονάδα μάζας, ονομάζεται Gray, συμβολίζεται με Gy και ορίζεται ως η απορροφώμενη δόση 1 joule ανά Kg υλικού.

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ joule/Kg} \quad [6.1]$$

Δεδομένου ότι η απορροφώμενη δόση ενός Gy είναι μεγάλη ως προς τις βιολογικές επιπτώσεις, χρησιμοποιούνται στην πράξη τα υποπολλαπλάσια του.

$$\text{Milli-Gray: } 1 \text{ mGy} = 10^{-3} \text{ Gy} \quad [6.2]$$

$$\text{Micro-Gray: } 1 \mu\text{Gy} = 10^{-6} \text{ Gy} \quad [6.3]$$

Η βιολογική επίπτωση εξαρτάται όχι μόνο από την απορροφώμενη δόση αλλά και από τον ρυθμό της δόσης, δηλαδή από την απορροφώμενη δόση ανά μονάδα χρόνου.

Επίσης, η βιολογική επίπτωση εξαρτάται όχι μόνο από την ενέργεια που εναπόθεσε η ραδιενεργός ακτινοβολία, αλλά και από το είδος της ακτινοβολίας. Τούτο δε, διότι η βιολογική επίπτωση εξαρτάται από την ποσότητα ενέργειας που εναποτίθεται ανά μονάδα μήκους τροχιάς του σωματιδίου στο βιολογικό ιστό. Μέτρο δε αυτού είναι η ονομαζόμενη γραμμική μεταφορά ενέργειας (LET: Linear Energy Transfer) L_{∞} , η οποία ορίζεται ως:

$$L_{\infty} = dEc/dx \quad [6.4]$$

Όπου:

dEc = η ενέργεια που εναποθέτει το σωματίδιο σε διάστημα dx της τροχιάς του.

Η τιμή L_{∞} εξαρτάται από το υλικό, την ενέργεια του σωματιδίου και κυρίως από το είδος του σωματιδίου. Σωματίδια με μεγάλο L_{∞} , όπως π.χ. τα α , αφήνουν τροχιά με μεγάλη πυκνότητα ιονισμού, πολύ μεγαλύτερη από τα φωτόνια που έχουν μικρό L_{∞} . Έτσι η ίδια δόση σε Gy προκαλεί πολύ μεγαλύτερη βιολογική επίπτωση, αν προέρχονται από σωματίδια α , απ' ό,τι αν προέρχονται από ακτινοβολία γ . Π.χ. έστω ότι ένα ποσό απορροφώμενης δόσης από σωματίδια α , δηλαδή ένα ποσό εναπόθεσης ενέργειας ανά Kg ιστού από σωματίδια α , επιφέρει κάποια βιολογική επίπτωση. Για την ίδια την βιολογική επίπτωση απαιτείται, κατά προσέγγιση, είκοσιπλάσια απορροφώμενη δόση από ακτινοβολία γ ή X. Στο παράδειγμα αυτό μπορούμε να πούμε ότι, για την ίδια απορροφώμενη δόση (δηλαδή την ίδια εναπόθεση ενέργειας ανά χιλιόγραμμα ιστού) η ακτινοβολία α είναι είκοσι φορές περίπου πιο αποτελεσματική βιολογικά, η είκοσι φορές «πιο επικίνδυνη», απ' ό,τι ακτινοβολία γ ή X. Εισήχθη λοιπόν ο **συντελεστής στάθμισης W_R** της ακτινοβολίας.

Ο καθαρός αριθμός W_R δίδει κατά προσέγγιση τη σχετική βιολογική αποτελεσματικότητα κάθε συγκεκριμένου είδους ακτινοβολίας, σε σχέση με την βιολογική αποτελεσματικότητα των ακτίνων γ ή X. Δηλαδή ο συντελεστής στάθμισης συγκεκριμένης ακτινοβολίας δηλώνει πόσες φορές μεγαλύτερη πρέπει να είναι η απορροφώμενη δόση από ακτινοβολία γ ή X, από την απορροφώμενη δόση από τη συγκεκριμένη ακτινοβολία, για να

επιφέρει το ίδιο βιολογικό αποτέλεσμα. Από το παράδειγμα που προηγήθηκε προκύπτει ότι ο συντελεστής στάθμισης της ακτινοβολίας α είναι $W_R=20$.

Στον Πίνακα 8 δίνονται τιμές του W_R σύμφωνα με τον κανονισμό ακτινοπροστασίας της χώρας μας και τη σχετική οδηγία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Η **ισοδύναμη δόση** ορίζεται ως το γινόμενο της απορροφούμενης δόσης σε Gy επί τον συντελεστή στάθμισης W_R .

$$(\text{ισοδύναμη δόση}) = (\text{απορροφώμενη δόση}) W_R \quad [6.5]$$

Η ισοδύναμη δόση μετράται σε **Sievert** (σύμβολο Sv), τα οποία προκύπτουν ως το γινόμενο της απορροφώμενης δόσης σε Gy επί τον συντελεστή στάθμισης W_R . Τα μέν Gy της απορροφώμενης δόσης δίνουν την ενέργεια που εναποθέτει η ακτινοβολία ανά χιλιόγραμμα ιστού, τα δε Sv της ισοδύναμης δόσης είναι μέτρο της διακινδύνευσης από την εναπόθεση της ενέργειας από συγκεκριμένη ακτινοβολία.

Δεδομένου ότι για τα φωτόνια (ακτινοβολίες γ ή X) είναι $W_R=1$, το μέγεθος της απορροφώμενης δόσης σε (Gy) είναι ίσο με το μέγεθος της ισοδύναμης δόσης (σε Sv) για τα φωτόνια.

ΕΙΔΟΣ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ	W_R
Φωτόνια οποιασδήποτε ενέργειας	1
Ηλεκτρόνια οποιασδήποτε ενέργειας	1
Νετρόνια με ενέργεια:	
Μικρότερη από: 10 keV	5
από: 10 keV έως 100 keV	10
από: 10 keV έως 2 MeV	20
από: 2 MeV έως 20 MeV	10
Μεγαλύτερη από: 20 MeV	5
Πρωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη από 2 MeV	5
Σωματίδια α , θραύσματα σχάσης, βαρείς πυρήνες	20

Πίνακας 8: Συντελεστής W_R στάθμισης των ιονιζουσών ακτινοβολιών

Δεδομένου ότι δόση 1 Sv είναι μεγάλη, χρησιμοποιούνται στην πράξη τα εξής υποπολλαπλάσιά του:

$$\text{Milli-Sievert: } 1 \text{ mSv} = 10^{-3} \quad [6.6]$$

$$\text{Micro-Sievert: } 1 \text{ } \mu\text{Sv} = 10^{-6} \text{ Sv} \quad [6.7]$$

$$\text{Nano-Sievert: } 1 \text{ nSv} = 10^{-9} \text{ Sv} \quad [6.8]$$

Η διακινδύνευση αυξάνεται με την αύξηση της ισοδύναμης δόσης. Πόση δόση είναι πολλή η λίγη; Προκειμένου να δοθεί αίσθηση των «φυσιολογικών δόσεων», παρατίθενται τιμές δόσεων από φυσική ραδιενέργεια, δηλαδή από τη ραδιενεργό ακτινοβολία που εκπέμπεται από το φυσικό περιβάλλον, μέσα στο οποίο ανεπτύχθη και έζησε επί χιλιετίες ο άνθρωπος. Από το έδαφος και τα οικοδομικά υλικά ο άνθρωπος δέχεται συνεχώς ακτινοβολία γ , εκτίθεται δηλαδή συνεχώς σε ακτινοβολία γ από το φυσικό του περιβάλλον. Δεδομένου ότι η έκθεση αυτή προέρχεται από το εξωτερικό του σώματος του ανθρώπου, ονομάζεται **εξωτερική έκθεση**.

Δεδομένου δε ότι η ακτινοβολία αυτή προσπίπτει ομοιογενώς σε ολόκληρο το σώμα του ανθρώπου, η αντίστοιχη δόση ονομάζεται **ολόσωμη δόση**. Έτσι ο ρυθμός της ολόσωμης ισοδύναμης δόσης στη Θεσσαλονίκη από αυτήν την εξωτερική έκθεση φυσικής ραδιενέργειας είναι 40 nSv ανά ώρα. Η δόση των 40 nSv ανά ώρα συνεπάγεται ετήσια δόση από φυσική ραδιενέργεια 0,35 mSv. Στην Αθήνα οι δόσεις από εξωτερική έκθεση από φυσική ραδιενέργεια είναι μισές περίπου από τις αντίστοιχες στην Θεσσαλονίκη, ενώ αυτές στην Καβάλα και στις Σέρρες είναι διπλάσιες περίπου από αυτές τις Θεσσαλονίκης. Η φυσική ραδιενέργεια παρουσιάζει και παρουσίαζε από γενέσεως κόσμου, μεγάλες γεωγραφικές διακυμάνσεις, όπως θα δούμε στο κεφάλαιο της φυσικής ραδιενέργειας, χωρίς αυτό να συνιστά πρόβλημα για τον άνθρωπο.

Παλαιότερα χρησιμοποιείτο ως μονάδα της απορροφώμενης δόσης το rad (από τα αρχικά του Radiation Absorbed Dose) και της ισοδύναμης δόσης το rem (από τα αρχικά του Radiation Equivalent Man). Είναι:

$$1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy} = 10 \text{ mGy} \quad [6.9]$$

$$1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Sv} = 10 \text{ mSv} \quad [6.10]$$

Οι εκθέσεις σε ακτινοβολία και οι αντίστοιχες δόσεις διακρίνονται σε ολόσωμες και σε δόσεις μεμονωμένων ιστών ή οργάνων. Η ίδια ποσότητα ισοδύναμης δόσης δεν επιφέρει τις ίδιες βιολογικές συνέπειες και δεν συνεπάγεται την ίδια διακινδύνευση για τα διάφορα όργανα και τους ιστούς. Ως εκ τούτου ορίστηκε ως μέτρο της διακινδύνευσης για τα διάφορα όργανα και ιστούς η **ενεργός δόση**, μετρούμενη και αυτή σε Sievert ως εξής:

$$(\text{Ενεργός δόση}) = (\text{ισοδύναμη δόση}) W_T \quad [6.11]$$

Όπου:

W_T = είναι συντελεστής στάθμισης για κάθε ιστό ή όργανο.

Οι συντελεστές στάθμισης I_T που ισχύουν στους Ελληνικούς κανονισμούς ακτινοπροστασίας και στη σχετική οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης δίνονται στο Πίνακα 9.

ΙΣΤΟΣ Ή ΟΡΓΑΝΟ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΣΤΑΘΜΙΣΗΣ W_T
Γεννητικοί αδένες	0,20
Μυελός οστών (ερυθρός)	0,12
Κόλον	0,12
Πνεύμονας	0,12
Στόμαχος	0,12
Ουροδόχος κύστη	0,05
Μαστός	0,05
Ήπαρ	0,05
Οισοφάγος	0,05
Θυροειδής αδένας	0,05
Δέρμα	0,01
Επιφάνεια οστού	0,01
Λοιπά	0,05

Πίνακας 9: Συντελεστής στάθμισης W_T για την ενεργό δράση

Για ολόσωμη δόση, δηλαδή για ολόκληρο το σώμα, ο συντελεστής W_T είναι 1. Έτσι, αν π.χ. οι γεννητικοί αδένες λάβουν ισοδύναμη δόση 100 mSv, η ενεργός δόση είναι 100 mSv x 0,2=20 mSv, ενώ αν το δέρμα λάβει ισοδύναμη δόση 100 mSv, η ενεργός δόση είναι 100 mSv x 0,01=1 mSv. Τέλος, αν η ισοδύναμη δόση για όλο το σώμα είναι 100mSv, τότε η αντίστοιχη ενεργός δόση είναι 100 mSv.

Ωστε: το μέτρο της διακινδύνευσης είναι η ενεργός δόση, η οποία στην περίπτωση ολόσωμης έκθεσης σε ακτινοβολία ισούνται με την ισοδύναμη δόση.

Τέλος μιλάμε για έκθεση ενός ανθρώπου, ζώου ή αντικειμένου σε συγκεκριμένη ακτινοβολία και εννοούμε ότι αυτά δέχθηκαν την συγκεκριμένη ακτινοβολία. Η λέξη έκθεση έχει όμως διπλή χρήση. Αποτέλεσε το πρώτο, ιστορικά, μέγεθος δοσιμετρίας και συνεχίζει από αδράνεια να χρησιμοποιείται και σήμερα. Είναι μέτρο της ποσότητας ιονισμού του αέρα από ακτινοβολίες γ ή X (φωτόνια) και μόνον από αυτές.

Μονάδα αυτής της έκθεσης είναι το Roentgen που ορίζεται ως εκείνη η ποσότητα ακτινοβολίας γ ή X που παράγει στον αέρα ιόντα με συνολικό ηλεκτρικό φορτίο $2.58 \cdot 10^{-4}$ Coulomb ανά Kg αέρα.

$$\text{Roentgen: } 1 R = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Cb/Kg αέρα} \quad [6.12]$$

Επειδή το 1 Roentgen (σύμβολο R) είναι πολύ μεγάλη ποσότητα ,χρησιμοποιούνται τα υποπολλαπλάσιά του: milliroentgen ($1 \text{ mR} = 10^{-3} \text{ R}$), microroentgen ($1 \mu\text{R} = 10^{-6} \text{ R}$).

Μπορεί να δειχθεί εύκολα ότι ακτινοβολία γ ή X ενός R εναποθέτει στον αέρα 8.69 mGy. Η ενέργεια που εναποτίθεται, άρα και η απορροφώμενη δόση εξαρτάται βέβαια από το υλικό. Έτσι, 1R εναποθέτει 9.6 mGy σε βιολογικό ιστό, κατά συνέπεια ή αντίστοιχη ισοδύναμη δόση είναι και αυτή 9.6 mSv. Οπότε μπορούμε κατά προσέγγιση να σκεφτούμε ότι:

$$\text{Ισοδύναμη δόση σε mSv} = 10 (\text{έκθεση σε R}) \quad [6.13]$$

Και επειδή υπό κανονικές συνθήκες οι ρυθμοί δόσης είναι της τάξης των nSv ανά ώρα, χρήσιμη είναι και η σχέση:

$$(\text{δόση σε nSv}) = (\text{έκθεση σε } \mu\text{R}) \quad [6.14]$$

6.3. ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Οι πηγές ραδιενέργειας στο περιβάλλον είναι αφ' ενός μεν φυσικές, αφ' ετέρου δε ανθρωπογενείς προϊόντα της ανθρώπινης τεχνολογίας. Το φυσικό περιβάλλον του ανθρώπου ήταν ανέκαθεν και εξακολουθεί να είναι περιβάλλον ραδιενεργού ακτινοβολίας. Η φυσική αυτή ακτινοβολία έχει προέλευση αφ' ενός μεν κοσμική (η γη βομβαρδίζεται συνέχεια με ιοντίζοντα σωματίδια από το διάστημα), αφ' ετέρου δε γήινη (ραδιενεργά ισότοπα στο φλοιό της γης). Οι δραστηριότητες του ανθρώπου αύξησαν τη ραδιενεργό ακτινοβολία που δέχεται από το περιβάλλον ήδη με την με την κατασκευή της κατοικίας με υλικά από τη γη, όπως η λάσπη και η πέτρα.

Οι πηγές ραδιενέργειας διακρίνονται σε εξωτερικές και εσωτερικές. **Εξωτερικές πηγές** ονομάζονται οι πηγές ακτινοβολίας που βρίσκονται έξω από το σώμα του ανθρώπου. Τέτοιες είναι η κοσμική ακτινοβολία και τα ραδιενεργά ισότοπα στην επιφάνεια της γης, στα οικοδομικά υλικά και στον αέρα. Οι **εσωτερικές**, ως προς το σώμα, πηγές είναι ραδιενεργές ουσίες, που καταλήγουν στο εσωτερικό του σώματος με την αναπνοή και τη διατροφή.

Ø Εξωτερικές πηγές

i. Κοσμική ακτινοβολία

Τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας βομβαρδίζονται με ιοντίζοντα σωματίδια από το διάστημα και τον ήλιο. Από αυτά το 79% είναι πρωτόνια, το 20% σωματίδια α και το υπόλοιπο 1% είναι ιόντα βαρέων ατόμων. Ελάχιστα από αυτά φθάνουν στην επιφάνεια της γης. Καθώς εισέρχονται στην ατμόσφαιρα, αλληλεπιδρούν με το οξυγόνο και το άζωτο στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας και παράγεται έτσι δευτερογενής ακτινοβολία από ακτίνες γ, νετρόνια και ηλεκτρόνια. Τμήμα αυτής της δευτερογενούς ακτινοβολίας καταλήγει στην επιφάνεια της Γης, ενώ το υπόλοιπο απορροφάται στην ατμόσφαιρα, η οποία συνιστά φυσική θωράκιση για την επιφάνεια της γης.

Η κοσμική ακτινοβολία αυξάνεται με την αύξηση του υψομέτρου από την επιφάνεια της γης. Χοντρικά μπορούμε να πούμε ότι η δόση που παίρνει κανείς από την κοσμική ακτινοβολία σε υψόμετρο 1600 μέτρων είναι περίπου διπλάσια από την αντίστοιχη δόση στην επιφάνεια της θάλασσας. Έτσι, η δόση από την κοσμική ακτινοβολία στην πόλη Denver, που βρίσκεται σε υψόμετρο 1600 περίπου μέτρων, είναι περίπου διπλάσια από την αντίστοιχη δόση στη Νέα Υόρκη. Ας σημειωθεί ακόμα ότι κατά την διάρκεια της πτήσης με αεροπλάνο σε ύψος 11 χιλιομέτρων μπορεί να παίρνει κανείς ρυθμό δόσης της τάξης των 0.004 mSv ανά ώρα. Συνεπώς σε ένα υπερατλαντικό αεροπορικό ταξίδι 10 ωρών λαμβάνει κανείς δόση 0.04 mSv, ήτοι περίπου 2% της μέσης ετήσιας δόσης από φυσική ραδιενέργεια στην επιφάνεια της γης. Η κοσμική ακτινοβολία είναι επίσης συνάρτηση του γεωμαγνητικού πλάτους, που συμπίπτει περίπου με το γεωγραφικό πλάτος. Είναι κατά 15% περίπου μεγαλύτερη κοντά στους πόλους από ό,τι στον ισημερινό. Και τούτο, διότι το μαγνητικό πεδίο της γης εκτρέπει τα φορτισμένα σωματίδια προς τους πόλους, καθώς αυτά ταξιδεύουν προς την επιφάνεια της γης.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειώσουμε την παραγωγή ισοτόπου C-14 στην ατμόσφαιρα από την αλληλοεπίδραση των δευτερογενών νετρονίων της κοσμικής ακτινοβολίας και του αζώτου. Ο C-14 διασπάται, με χρόνο ημιζωής 5730 έτη, εκπέμποντας σωματίδια β. Από το ισοζύγιο παραγωγής-διάσπασης του C-14 προέκυψε στην ατμόσφαιρα σταθερή συγκέντρωση, η συγκέντρωση ισορροπίας. Τα φυτά με την φωτοσύνθεση προσλαμβάνουν από την ατμόσφαιρα CO₂, άρα και C-14, και παράγουν υδρογονάνθρακες. Τα ζώα και ο άνθρωπος προσλαμβάνουν C-14 μέσω της διατροφής με φυτικά προϊόντα και με την αναπνοή. Συγκεντρώνεται έτσι ραδιενεργός C-14 σε όλους τους ζωντανούς οργανισμούς (ζώα, φυτά κλπ.) και ίση με αυτήν της ατμόσφαιρας (περίπου 300 Bq ανά kg άνθρακα). Όταν βέβαια ο οργανισμός πεθάνει, παύει να προσλαμβάνει C-14. Με την διάσπαση του C-14 μειώνεται σταθερά με την πάροδο του χρόνου η συγκέντρωση C-14 στο νεκρό οργανισμό. Αυτή η μείωση αποτελεί την αρχή μέτρησης της ηλικίας υλικών στην αρχαιολογία.

ii. Ακτινοβολία από τη γη

Τόσο στο φλοιό όσο και στην επιφάνεια της γης υπάρχουν φυσικά ραδιενεργά ισότοπα. Σε μικρές αναλογίες (της τάξης μερικών ατόμων στο εκατομμύριο) ισότοπα του U-238, του Th-232 (πατριαρχών την δύο σειρών φυσικών ραδιενεργών νουκλιδίων) και των προϊόντων της διάσπασης τους υπάρχουν σχεδόν παντού στο φλοιό και την επιφάνεια της γης. Το ουράνιο βρίσκεται στη γη με την μορφή UO₂ και η συγκέντρωσή του διαφέρει σημαντικά από τόπο σε τόπο, με μέγιστη συγκέντρωση στα κοιτάσματα φυσικού ουρανίου, όπου το UO₂ είναι περίπου το 0.1 μέχρι 0.5% της μάζας του ορυκτού. Τα ραδιενεργά ισότοπα στο φλοιό της γης εκπέμπουν ακτινοβολίες άλφα, βήτα και γάμμα. Δεδομένου όμως ότι τα σωματίδια άλφα και βήτα αδυνατούν να διέλθουν ακόμα και από το ίδιο έδαφος (ή το οικοδομικό υλικό) και τον αέρα και δεν φθάνει στο ανθρώπινο σώμα. Έτσι η μόνη αξιόλογη εξωτερική ακτινοβολία που δέχεται ο άνθρωπος από την γη και τα οικοδομικά υλικά είναι ακτινοβολία γάμμα. Τυπική τιμή δόσης από εξωτερική έκθεση από τη γη είναι 0.5 mSv ανά

έτος(περίπου 23% της μέσης ετήσιας δόσης) με τυπικό εύρος τιμών στις διάφορες γεωγραφικές περιοχές από 0.3 ως 0.6 mSv ανά έτος. Είναι φανερό ότι η ένταση της ακτινοβολίας από τη γη εξαρτάται από τα ορυκτά που υπάρχουν κοντά στην επιφάνεια της γης και κυρίως από την συγκέντρωση ουρανίου σε κάθε θέση, Έτσι η δόση από τη γήινη ακτινοβολία στην πόλη Aberdeen της Σκωτίας είναι περίπου διπλάσια από αυτήν του Λονδίνου. Στη Νέα Υόρκη η δόση ακτινοβολίας γ από τη γη είναι περίπου 0.6 mSv ανά έτος, ενώ στη Βραζιλία και στην Ινδία, σε κατοικημένες επί αιώνες περιοχές με έδαφος πλούσιο σε θόριο, η αντίστοιχη δόση είναι 20 mSv ανά έτος. Κι αν στα προηγούμενα παραδείγματα οι αποστάσεις μεταξύ Σκωτίας, Λονδίνου κλπ θεωρούνται μεγάλες, στη Νέα Υόρκη οι κάτοικοι του Μανχάταν, που είναι χτισμένο πάνω σε βράχο πλούσιο σε Ράδιο, παίρνουν εξωτερική δόση 15% περισσότερο από τους γείτονες τους που ζουν στο Μπρούκλιν.

Η εξωτερική δόση στη Θεσσαλονίκη είναι περίπου διπλάσια, ενώ στις Σέρρες και στην Ξάνθη περίπου τετραπλάσια ,από την εξωτερική δόση στην Αθήνα. Αυτό οφείλεται κυρίως στις διαφορετικές περιεκτικότητες σε ουράνιο την εδαφών των διάφορων περιοχών. Υπάρχουν περιοχές της γης στις οποίες η δόση από φυσική ραδιενέργεια είναι εκατό ή και χίλιες φορές μεγαλύτερη από την παγκόσμια μέση τιμή και αυτό ουδεμία ανησυχία δικαιολογεί δεδομένου ότι οι άνθρωποι έζησαν υγιώς στα περιβάλλοντα αυτά επί χιλιάδες χρόνια.

Ø Εσωτερικές πηγές

Σημαντική φυσική εσωτερική πηγή ραδιενέργειας είναι το ραδιενεργό ισότοπο κάλιο-40 (K-40) που βρίσκεται στο φυσικό κάλιο σε ποσοστό 0.0118%. Τα φυτά αντλούν το απαραίτητο γι' αυτά κάλιο από τη γη, τα ζώα από τα φυτά μέσω της τροφής και ο άνθρωπος από τη διατροφή. Το ποσό του καλίου στη γη δεν εξαρτάται σημαντικά από τη γεωγραφική θέση, άρα και η ποσότητα του K-40 στο ανθρώπινο σώμα δεν εξαρτάται σημαντικά από τον τόπο που ζει ο άνθρωπος.

Σημαντική εσωτερική πηγή ραδιενέργειας αποτελούν ακόμα το U-238 και προϊόντα της αλυσίδας διάσπασής του καθώς και προϊόντα της αλυσίδας διάσπασης του Th-232. Στη σειρά διάσπασης του U-238 βρίσκεται το ραδιενεργό ισότοπο Ra-226. Τα ισότοπα αυτά εισέρχονται στο σώμα του ανθρώπου και των ζώων μέσω της τροφικής αλυσίδας. Το ράδιο είναι χημικά παρόμοιο με το ασβέστιο, με αποτέλεσμα να συσσωρεύεται στα οστά. Η συνολική ενεργότητα των φυσικών ραδιοισοτόπων που βρίσκονται στο εσωτερικό του ανθρώπινου σώματος είναι κατά μέσο όρο 277 Bq περίπου. Μακρόβια ραδιοισότοπα φυσικής προέλευσης που έχουν βρεθεί σε σώματα ανθρώπων, καθώς και η μετρηθείσα ενεργότητα τους στο σώμα, παρουσιάζονται στον πίνακα 10. Το ανθρώπινο σώμα εκπέμπει ραδιενέργεια.

ΙΣΟΤΟΠΟ	ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΑ ΣΤΟ ΣΩΜΑ(BQ)
Ουράνιο-238	0.096
Ράδιο-226	0.45
Ράδιο -228	0.18
Μόλυβδος -210	2.2
Πολώνιο-210	0.74
Κάλιο-40	480
Ανθρακας-14	322
Τρίτιο (H-3)	103
Ρουβίδιο-87	107
Στρόντιο-90	11

Πίνακας 10: Μακρόβια ραδιοισότοπα φυσικής προέλευσης σε σώματα ανθρώπων

Το Ra-226 με άλφα διάσπαση και χρόνο ημιζωής 1620 έτη παράγει το ραδιενεργό ισότοπο Rn-222 (ραδόνιο) ,που είναι αδρανές αέριο. Έτσι, από τα υλικά που περιέχουν U-238 και τα θυγατρικά του νουκλίδια και βρίσκονται σε επαφή με την ατμόσφαιρα (π.χ. κοντά στην επιφάνεια της γης, σε οποιοδήποτε ορυχείο, στα δομικά υλικά του χτισμένου χώρου) διαφεύγει το αέριο ραδόνιο και διαχέεται στην ατμόσφαιρα. Το ραδόνιο και τα θυγατρικά του νουκλίδια εισέρχονται στους πνεύμονες με την αναπνοή. Ένα μικρό μέρος του αερίου ραδονίου διαλύεται στο αίμα και διαχέεται σε ολόκληρο το σώμα. Ένα άλλο μέρος επιστρέφει στην ατμόσφαιρα με την εκπνοή. Το υπόλοιπο διασπάται και τα στερεά θυγατρικά του νουκλίδια επικάθονται στους πνεύμονες. Η βιολογική βλάβη των πνευμόνων προκαλείται κυρίως από τα σωματίδια α, που εκπέμπουν τα στερεά θυγατρικά νουκλίδια του ραδονίου. Μεγάλες δόσεις από το ραδόνιο και τα θυγατρικά του είναι δυνατόν να προκαλέσουν καρκίνο των πνευμόνων.

Η συγκέντρωση του ραδονίου στην ατμόσφαιρα εξαρτάται από την ποσότητα ουρανίου στο έδαφος κάθε περιοχής. Ενδεικτική μέση τιμή της φυσικής συγκέντρωσης ραδονίου στην ατμόσφαιρα είναι 5 Bq ανά m³ αέρα. Οι συγκεντρώσεις ραδονίου στην ατμόσφαιρα των υπαίθριων χώρων και οι αντίστοιχες δόσεις θεωρούνται γενικά αμελητέες για την υγεία.

Αντίστοιχα ισχύουν και για τα θυγατρικά νουκλίδια της σειράς του Th-232, στη σειρά διάσπασης του οποίου βρίσκεται το ραδιενεργό ισότοπο Ράδιο-228.Το Ράδιο-228 συγκεντρώνεται και αυτό στα οστά. Με α-διάσπαση παράγει το ραδιενεργό ραδόνιο-220, που είναι και αυτό αδρανές αέριο. Τα θυγατρικά του νουκλίδια είναι στερεά στοιχεία και διασπώνται με εκπομπή σωματιδίων α. Ως προς τη συγκέντρωση του στην ατμόσφαιρα και τις συνέπειές της ισχύουν τα ίδια με το ραδόνιο-22

Ø Δόσεις από φυσική ραδιενέργεια

Ο Πίνακας 11 συνοψίζει την παγκόσμια μέση τιμή της ενεργού δόσης από φυσική ραδιενέργεια. Η συνολική δόση των 2.2 mSv ανά έτος οφείλεται κατά 40% σε εξωτερική και κατά 60% περίπου σε εσωτερική έκθεση. Εμφανίζει τυπικό εύρος τιμών από 1 ως 10 mSv. Η εξωτερική δόση οφείλεται σχεδόν εξίσου στις πηγές της γήινης και της κοσμικής ακτινοβολία. Διακυμάνσεις γύρω από τη μέση τιμή αυτών των συνιστωσών των δόσεων με συντελεστή 5 ως 10 δεν είναι ασυνήθιστες.

ΠΗΓΗΣ	mSv ANA ΕΤΟΣ
Εξωτερικές πηγές	
Κοσμική ακτινοβολία	0.4
Γήινη (ακτίνες γ)	0.5
Εσωτερικές πηγές	
Αναπνοή (κυρίως ραδονίου)	1.0
Διατροφή	0.3
Σύνολο	2.2

Πίνακας 11: Παγκόσμια μέση τιμή της ενεργού δόσης από φυσική ραδιενέργεια (UNSCEAR 2000)

Ø Ανθρωπογενείς πηγές

Οι κύριες ανθρωπογενείς πηγές ραδιενέργειας στο περιβάλλον είναι: τα δομικά υλικά, οι πυρηνικές δοκιμές (ατομικές βόμβες) ,οι ιατρικές και βιομηχανικές εφαρμογές ,τα συμβατικά καύσιμα και η πυρηνική βιομηχανία.

(α) Δομικά υλικά: ορυκτής προέλευσης, όπως π.χ. η πέτρα, το μπετόν και ο γύψος, περιέχουν μικρές ποσότητες ραδίου και εκλύουν αέριο ραδόνιο, το οποίο διαχέεται στην ατμόσφαιρα του κτισμένου χώρου. Ραδόνιο ανέρχεται επίσης από το εσωτερικό της γης στους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων δια διαφόρων οδών, όπως π.χ. οι οπές μεταξύ πατώματος και σωληνώσεων. Η δόση λοιπόν από την συγκέντρωση ραδονίου στον κτισμένο χώρο εξαρτάται από τα δομικά υλικά και από τον εξαερισμό των κτισμένων χώρων (όσο περισσότερος εξαερισμός τόσο μικρότερες συγκεντρώσεις ραδονίου και άρα τόσο μικρότερες δόσεις) και παρουσιάζει μεγάλες γεωγραφικές και τοπικές διακυμάνσεις. Σε χτισμένους χώρους με δομικά υλικά από σχιστόλιθο ή πέτρες από φωσφορικά πετρώματα η δόση μπορεί να είναι μεγάλη, διότι η συγκέντρωση ουρανίου στα υλικά αυτά είναι μεγαλύτερη από τη μέση.

(β) Οι δοκιμές των πυρηνικών όπλων στην ατμόσφαιρα προκάλεσαν τη μεγαλύτερη ανθρωπογενή ραδιενεργό ρύπανση του περιβάλλοντος. Ρύπαναν την ατμόσφαιρα με προϊόντα της σχάσης, που επικάθισαν στα σωματίδια σκόνης και νερού που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα. Τα πιο βαριά από αυτά τα σωματίδια εναποτέθηκαν στην επιφάνεια της γης στην περιοχή της πυρηνικής έκρηξης, ενώ τα ελαφρύτερα σωματίδια σκόνης και νερού παρέμειναν αιωρούμενα και με την πάροδο του χρόνου διαχύθηκαν στην ατμόσφαιρα όλης της γης, με αποτέλεσμα την αύξηση της ανά άτομο δόσης παγκοσμίως. Υπολογίζεται ότι από τις δοκιμές αυτές, από το πλουτώνιο που διέφυγε τη σχάση και από αντιδράσεις U-238 με νετρόνια των θερμοπυρηνικών εκρήξεων, προέκυψε παγκόσμια διασπορά 8 περίπου τόνων πλουτώνιο. Η ετήσια δόση από τις πηγές αυτές μειώνεται συνέχεια μετά τη συμφωνία απαγόρευσης των πυρηνικών εκρήξεων στην ατμόσφαιρα από τις ΗΠΑ, ΕΣΣΔ και Αγγλία το 1963. Υπολογίζεται ότι η σχετική ετήσια δόση ανά άτομο ήταν 0.13 mSv το 1963, 0.067 mSv το 1965 και 0.040 mSv το 1969. Πυρηνικές δοκιμές στην ατμόσφαιρα μετά το 1963 έχουν κάνει η Γαλλία και η Κίνα. Από το 1980 δεν έχουν γίνει πυρηνικές δοκιμές στην ατμόσφαιρα και σύμφωνα με την UNSCEAR η σημερινή παγκόσμια μέση τιμή της δόσης ανά άτομο από τις πυρηνικές δοκιμές είναι 0.005 mSv ανά έτος.

(γ) τα συμβατικά καύσιμα: οι συμβατικοί ηλεκτροπαραγωγοί σταθμοί ,με καύσιμο γαιάνθρακες, ρυπαίνουν το περιβάλλον με ουράνιο, θόριο, ράδιο και ραδόνιο και τούτο διότι: ο γαιάνθρακας περιέχει μικρές ποσότητες ουρανίου, με αποτέλεσμα την έκλυση ραδιενεργών ισοτόπων με τα καύσιμα και την τέφρα. Σε πολλά μέρη του κόσμου, όπως π.χ. στην Ευρώπη και την Αμερική, το φυσικό αέριο χρησιμοποιείται ως καύσιμο σε μεγάλη έκταση, τόσο στην βιομηχανία όσο και στην κατοικία. Το φυσικό αέριο περιέχει Rn-222 και έτσι σε μια κουζίνα που χρησιμοποιεί φυσικό αέριο και δεν έχει καλό εξαερισμό, η δόση μπορεί να είναι σημαντική.

(δ) η πυρηνική βιομηχανία συμβάλλει στην αύξηση της ραδιενέργειας του περιβάλλοντος κατά την παραγωγή του πυρηνικού καυσίμου, κατά την λειτουργία των πυρηνικών σταθμών και τέλος με την παραγωγή και την διαχείριση των ραδιενεργών καταλοίπων. Τα ορυκτά από τα οποία εξορύσσεται το ουράνιο περιέχουν ουράνιο σε αναλογία 0.1 ως 0.5% κατά βάρος. Κατά την εξόρυξη του ορυκτού απελευθερώνονται μεγάλες ποσότητες αερίου ραδονίου. Τα αέρια αυτά αποτελούν σοβαρό κίνδυνο για την υγεία των μεταλλωρύχων και πρέπει να απομακρύνονται από τις στοές του υπόγειου ορυχείου με κατάλληλο εξαερισμό. Μετά την εξόρυξη το ορυκτό μεταφέρεται στον «μύλο ουρανίου», όπου πρώτα τεμαχίζεται σε μικρά κομμάτια και στη συνέχεια αλέθεται και υποβάλλεται σε κατάλληλη χημική επεξεργασία για την αύξηση της συγκέντρωσης του ουρανίου με διαχωρισμό του ουρανίου από το υπόλοιπο ορυκτό. Το τελικό προϊόν, που έχει κίτρινο χρώμα και ονομάζεται στην αγορά «κίτρινο κέικ» (yellowcake), περιέχει το ουράνιο σε αναλογία 70 ως 90%. Το υπόλοιπο μέρος του ορυκτού είναι άχρηστο κατάλοιπο και ονομάζεται «ουρά του ουρανίου» (tailing). Σχεδόν όλο το Rn-226 και το μητρικό του Th-230, που είναι ραδιενεργά νουκλίδια της σειράς του Ra-226, που είναι προϊόν της διάσπασης του Th-226. Δεδομένου

του μικρού χρόνου ημιζωής (1600 έτη) του Ra-226 σε σχέση με το χρόνο ημιζωής του Th-230 (80000 έτη), ο ρυθμός παραγωγής του ραδονίου ελέγχεται από τη διάσπαση του Th-230. Θα παραμείνει λοιπόν σταθερός για πολλές χιλιάδες χρόνια. Είναι φανερό ότι υπάρχει πρόβλημα μακροπρόθεσμου ελέγχου των ουρών για την προστασία πολλών επόμενων γενεών.

Μέχρι τώρα οι ουρές μετά την αποξήρανσή τους καλύπτονται με χώμα πάχους 30 περίπου εκατοστών, το δε έδαφος σταθεροποιείται με τη φύτευση γρασιδιού. Αυτό περιορίζει την εκροή ραδονίου σε ανεκτά όρια. Είναι όμως προφανώς ανεπαρκές όχι μόνο μακροπρόθεσμα, αφού μια δυνατή βροχή και μόνο μπορεί να παρασύρει μέρος της μάζας των ούρων.

Αλλά και κατά την κανονική, ομαλή λειτουργία του αντιδραστήρα πραγματοποιούνται ελεγχόμενες υγρές και αέριες εκροές ραδιενεργών προϊόντων στο περιβάλλον. Οι κανονισμοί ακτινοπροστασίας και αδειοδότησης των πυρηνικών αντιδραστήρων επιβάλλουν τέτοιο σχεδιασμό και διαδικασίες λειτουργίας τους, ώστε οι εκροές ραδιενεργών προϊόντων στο περιβάλλον να μην προκαλούν στο ευρύ κοινό δόσεις μεγαλύτερες από τα προκαθορισμένα εθνικά όρια. Σύμφωνα με το UNSCEAR 2000 οι δόσεις επιπλέον της φυσικής ραδιενέργειας σε άτομα που ζουν κοντά σε πυρηνικούς σταθμούς είναι της τάξης των 0.001 mSv ανά έτος, δηλαδή μικρές.

Μεγάλο ατύχημα σε πυρηνικό αντιδραστήρα ενδέχεται να προκαλέσει σημαντική ρύπανση του περιβάλλοντος και σημαντικές δόσεις σε πληθυσμούς κυρίως στην περιοχή του ατυχήματος. Το ατύχημα στον αντιδραστήρα του Three Mile Island στις Ηνωμένες Πολιτείες το 1979 προκάλεσε μικρές διαρροές ραδιενεργών προϊόντων στο περιβάλλον. Το ατύχημα του Chernobyl επέφερε εκτεταμένες διαρροές ραδιενεργών προϊόντων στο περιβάλλον και η διασπορά των ραδιενεργών προϊόντων ήταν μετρήσιμη στο μεγαλύτερο μέρος του Βορείου Ημισφαιρίου. Οι εκτιμήσεις δόσεων λόγω του ατυχήματος στις χώρες της Κεντρικής και Ανατολικής Ευρώπης (UNSCEAR 2000) για το πρώτο έτος μετά το ατύχημα είναι της τάξης των 0.3 ως 0.8 mSv ανά έτος και άτομο, δηλαδή μικρότερες από τη μέση τιμή της δόσης επιπλέον της φυσικής. Βεβαίως οι δόσεις και οι συνέπειες για την υγεία των κατοίκων της περιοχής του ατυχήματος υπήρξαν σοβαρές. Κατά τη λειτουργία του αντιδραστήρα παράγονται τα ραδιενεργά προϊόντα της σχάσης, τα οποία είναι άχρηστα ραδιενεργά κατάλοιπα.

(ε) ιατρικές εφαρμογές: από τις τεχνολογικές πηγές τη σημαντικότερη μέση δόση ανά άτομο παρέχουν οι ακτινογραφίες στην ιατρική και την οδοντιατρική. Η δόση από μία ακτινογραφία θώρακος είναι περίπου 0.14 mSv και από μία ακτινογραφία οδόντων περίπου 0.02 mSv. Συνεχώς αυξανόμενη είναι επίσης η χρήση ραδιοϊσοτόπων στην διαγνωστική (π.χ. I-131 για τον θυροειδή αδένα και Th-201 για την καρδιά) και θεραπευτική ιατρική. Η δόση από μία τομογραφία καρδιάς με Th-201 είναι περίπου 10 έως 20 mSv και από μία ολόσωμη αξονική τομογραφία περίπου 15 mSv. Στη θεραπευτική ιατρική οι απορροφώμενες δόσεις είναι πολύ μεγαλύτερες. Π.χ. η απορροφώμενη δόση από ακτινοβολία X στο μαστό μετά από εγχείρηση καρκίνου είναι περίπου 50 ως 70 Gy.

6.4. ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

Το είδος, το μέγεθος και η πιθανότητα εμφάνισης της βιολογικής βλάβης, που μπορεί να προκαλέσει στον άνθρωπο η έκθεση σε ιοντίζουσα ακτινοβολία εξαρτάται (α) από το μέγεθος και τον ρυθμό της δόσης και (β) από το μέρος του σώματος που εκτίθεται στην ακτινοβολία. Οι βιολογικές αυτές βλάβες, διακρίνονται σε σωματικές επιπτώσεις των

ακτινοβολιών που μπορεί να είναι άμεσες ή καθυστερημένες και στις γενετικές επιπτώσεις των ακτινοβολιών.

Άμεσες σωματικές επιπτώσεις ονομάζονται οι σωματικές επιπτώσεις που εμφανίζονται σε άτομα που εκτέθηκαν σε ραδιενέργεια και στις οποίες τα συμπτώματα εμφανίζονται μέσα σε λίγες ώρες ή/και μέχρι 60 περίπου μέρες από την έκθεση στην ακτινοβολία. Προκύπτουν μόνο από εξαιρετικά έντονη έκθεση σε ακτινοβολία, έκθεση δηλαδή ολόκληρου ή μεγάλου μέρους του σώματος σε δόσεις συνήθως μεγαλύτερες από 500 mSv που ελήφθησαν σε διάστημα χρόνου μικρότερο από μια ημέρα. Στατιστικά δεδομένα τέτοιων εκθέσεων έχουμε κυρίως από τα θύματα των ατομικών βομβών στην Ιαπωνία (1945) και σε μικρότερο βαθμό από λίγα εργαστηριακά ατυχήματα και από ασθενείς που εκτέθηκαν σε έντονη ακτινοβολία για θεραπευτικούς σκοπούς. Συμπεράσματα από τέτοιες στατιστικές μελέτες συνοψίζονται στον Πίνακα 12.

ΔΟΣΗ (σε Sv)	ΠΙΘΑΝΑ ΣΥΜΠΤΩΜΑΤΑ
0-0.5	Δεν υπάρχουν παρατηρήσιμα συμπτώματα
0.5-1	Ελαφρές αλλαγές στο αίμα. Κανένα άλλο Παρατηρήσιμο σύμπτωμα. Εμετός μέσα σε λίγες ώρες ,σε 5% ως 50%
1-2	Των περιπτώσεων ,με κόπωση και απώλεια ορέξεως. Μέτριες μεταβολές στο αίμα .Σε κάθε περίπτωση επέρχεται ανάρρωση από τα συμπτώματα αυτά μέσα σε λίγες εβδομάδες
2-6	Δόση μεγαλύτερη από 3 Sv προκαλεί ,σε κάθε περίπτωση, εμετό σε χρόνο λιγότερο από 2 ώρες. Σοβαρές μεταβολές στο αίμα ,που συνοδεύονται από αιμορραγία και αυξανόμενη επιδεκτικότητα σε μόλυνση καθώς αυξάνεται η δόση. Απώλεια των μαλλιών μετά 2 εβδομάδες για δόσεις μεγαλύτερες από 3 Sv. Ανάρρωση από τα συμπτώματα αυτά μέσα σε ένα μήνα ως ένα χρόνο στις περισσότερες περιπτώσεις δόσεων κοντά στο όριο των 2 Sv. Στις περιπτώσεις δόσεων κοντά στο άνω όριο των 6 Sv επιβιώνει μόνο το 20% περίπου.
6-10	Εμετός μέσα σε μια ώρα, σοβαρές μεταβολές του αίματος. Αιμορραγία, μολύνσεις, απώλεια μαλλιών. Σε 80% ως 100% επέρχεται θάνατος μέσα σε 2 μήνες. Μακρότατος χρόνος ανάρρωσης από τα συμπτώματα αυτά όσων επέζησαν.

Πίνακας 12: Άμεσες σωματικές επιπτώσεις από ολόσωμη έντονη ακτινοβολία

Τα συμπτώματα του Πίνακα 12 εμφανίζονται μόνο στις περιπτώσεις ακτινοβόλησης ολόκληρου ή μεγάλου μέρους του σώματος. Είναι γνωστό π.χ. από ιατρικές-θεραπευτικές εφαρμογές, ότι η απορρόφηση σε μικρή περιοχή του σώματος δόσεων αντίστοιχων με αυτές του Πίνακα 12 επιφέρει πολύ μικρότερες βλάβες. Όπως φαίνεται από τον πίνακα 12, το μέγεθος της βλάβης είναι αύξουσα συνάρτηση της δόσης. Μπορούμε ακόμα να πούμε ότι για τις άμεσες σωματικές επιπτώσεις υπάρχει κατώφλι δόσης της τάξης των 500 mSv, κάτω από το οποίο δεν υπάρχουν παρατηρήσιμα άμεσα συμπτώματα.

Καθυστερημένες σωματικές επιπτώσεις ονομάζονται οι σωματικές επιπτώσεις που εμφανίζονται σε άτομα που εκτέθηκαν στη ραδιενέργεια και εμφανίζονται με καθυστέρηση που μπορεί να κυμαίνεται από ένα μέχρι περίπου τριάντα χρόνια μετά την έκθεση σε έντονη ακτινοβολία. Οι επιπτώσεις αυτές οφείλονται συνήθως σε αλλοιώσεις που προκαλούνται στα γονίδια που περιέχει το DNA, δηλαδή σε μεταλλάξεις. Υπάρχει πλήθος δεδομένων (π.χ. από

αυτούς που επέζησαν μετά τις ατομικές εκρήξεις το 1945 στην Ιαπωνία ,από τους ακτινολόγους των πρώτων δεκαετιών του 20^{ου} αιώνα, από ασθενείς που εκτέθηκαν σε έντονη ακτινοβολία για θεραπευτικούς σκοπούς), που δείχνουν ότι η έκθεση σε έντονη ακτινοβολία επιφέρει καθυστερημένες σωματικές επιπτώσεις, όπως λευχαιμίες, καρκίνους (π.χ. του θυροειδούς αδένος, που παρατηρείται ιδιαίτερος σε νεαρά άτομα ή του καρκίνου των πνευμόνων που έχει παρατηρηθεί σε εργάτες υπόγειων ορυχείων ουρανίου), προσωρινή ή και μόνιμη στειρώση, δυσλειτουργία διάφορων οργάνων του σώματος, καταρράκτη των οφθαλμών. Ο καταρράκτης των οφθαλμών είναι μια από τις λίγες καθυστερημένες σωματικές επιπτώσεις όπου φαίνεται να υπάρχει κατώφλι δόσης. Ο καταρράκτης δεν εμφανίζεται στις περιπτώσεις έντονων δόσεων μικρότερων από περίπου 2 Sv.

Από την συμπτωματολογία της ίδιας της ασθένειας είναι αδύνατο να αποδειχθεί αν αυτή προκλήθηκε από την έκθεση σε ακτινοβολία ή από άλλη συνήθη αιτία. Για παράδειγμα, η λευχαιμία παρουσιάζεται ακριβώς με τα ίδια συμπτώματα ανεξάρτητα από την αιτία που την προκάλεσε (έντονη ακτινοβολία σε κάποιο μακρινό παρελθόν ή άλλη διαφορετική αιτία). Ο προσδιορισμός της ακτινοβολίας ως γενεσιουργού αιτίας της ασθένειας μπορεί να γίνει μόνο στατιστικά. Απαιτείται δηλαδή μελέτη της συχνότητας εμφάνισης της ασθένειας σε μεγάλο πληθυσμό ακτινοβολημένων ατόμων, σε σύγκριση με την αντίστοιχη συχνότητα σε πληθυσμό με μόνη ακτινοβολία αυτή του φυσικού υπόβαθρου. Δεδομένα για τέτοιες μελέτες υπάρχουν στους επιζήσαντες των βομβαρδισμών με πυρηνικά όπλα στις πόλεις Ναγκασάκι και Χιροσίμα. Υπάρχουν ακόμα πειραματικά δεδομένα εργαστηριακής ακτινοβολίας εκατοντάδων χιλιάδων (για κάθε δόση) ποντικών, που είναι ζώα θηλαστικά όπως και ο άνθρωπος.

Τα κύρια αποτελέσματα από την ανάλυση των δεδομένων αυτών είναι:

- Η συχνότητα εμφάνισης της ασθένειας ,δηλαδή το ποσοστό του πληθυσμού το οποίο ασθενεί, είναι αύξουσα συνάρτηση της συσσωρευμένης δόσης, με πιθανή εξαίρεση τις εξαιρετικά μεγάλες δόσεις.
- Για μικρές συσσωρευμένες δόσεις π.χ. δόσεις μικρότερες από mSv, δεν έχουν εντοπισθεί ούτε καθυστερημένα κλινικά συμπτώματα.

Η έλλειψη εντοπισμού επιπτώσεων από έκθεση σε χαμηλές δόσεις ραδιενέργειας δεν σημαίνει αναγκαστικά ότι δεν υπάρχουν καθυστερημένες επιπτώσεις για μικρές δόσεις. Σημαίνει ότι, αν υπάρχουν, ενδέχεται να εμφανισθούν σε ένα μικρό ποσοστό των ατόμων που ακτινοβολήθηκαν. Αυτό δε το ποσοστό αναμένεται να είναι τόσο μικρό, ώστε για την ενοχοποίηση της ακτινοβολίας για την ασθένεια απαιτείται επιδημιολογική μελέτη σε μεγάλο πληθυσμό για τον οποίο είναι γνωστή με ικανοποιητική ακρίβεια η συνήθης, από άλλες αιτίες, συχνότητα εμφάνισης της ασθένειας.

Από την άλλη μεριά, το κύριο ενδιαφέρον για την καθιέρωση κανόνων ακτινοπροστασίας, βρίσκεται στις εξαιρετικά μικρές αλλά χρόνιες δόσεις. Ο μόνος λοιπόν τρόπος εκτίμησης των καθυστερημένων βιολογικών επιπτώσεων που μπορεί να έχουν οι μικρές χρόνιες δόσεις είναι η επέκταση των δεδομένων των μεγάλων δόσεων στις μικρές. Οι εκτιμήσεις αυτές οφείλουν να είναι συντηρητικές, να είναι δηλαδή βέβαιο ότι υπερεκτιμούν τον πραγματικό κίνδυνο. Βασίζονται σε τρεις υποθέσεις:

1. Ότι δεν υπάρχει κατώφλι δόσης κάτω από το οποίο η διακινδύνευση (η συχνότητα) εμφάνισης της βιολογικής επίπτωσης να είναι μηδενική. Γίνεται δηλαδή η υπόθεση ότι για οποδήποτε μικρή δόση υπάρχει πεπερασμένη πιθανότητα βιολογικής επίπτωσης.
2. Ότι η πιθανότητα (συχνότητα) εμφάνισης της βιολογικής επίπτωσης είναι ανάλογη της συσσωρευμένης δόσης.
3. Ότι η πιθανότητα να εμφανισθεί η βιολογική επίπτωση είναι ανεξάρτητη από τον ρυθμό της δόσης, ότι εξαρτάται μόνον από τη συνολική συσσωρευμένη δόση. Η

υπόθεση αυτή προϋποθέτει ανικανότητα του οργανισμού να επιδιορθώσει βλάβες, όπως για παράδειγμα να αντικαταστήσει αλλοιωμένα κύτταρα, έστω και αν οι βλάβες είναι μικρές και επέρχονται σε αραιά διαστήματα από αντίστοιχα μικρούς ρυθμούς δόσης. Γίνεται δηλαδή η υπόθεση ότι οι βλάβες συσσωρεύονται καθώς προστίθενται μικρές δόσεις.

Σχετικά τώρα με την αλήθεια των τριών αυτών υποθέσεων: πειράματα σε μεγάλους πληθυσμούς ποντικών δείχνουν ότι για την ίδια συσσωρευμένη δόση η πιθανότητα εμφάνισης λευχαιμίας είναι μεγαλύτερη για μεγαλύτερους ρυθμούς δόσης, δηλαδή η πιθανότητα αυξάνεται όταν η ίδια συσσωρευμένη δόση δίνεται σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Αυτή η παρατήρηση δείχνει ότι η υπόθεση 3 υπερεκτιμά την πιθανότητα εμφάνισης βιολογικής επίπτωσης. Τόσο τα πειράματα αυτά, όσο και άλλες παρατηρήσεις, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι υπολογισμοί με βάση τις τρεις αυτές υποθέσεις οδηγούν σε υπερεκτίμηση της υπολογιζόμενης διακινδύνευσης από έκθεση σε ραδιενέργεια. Δηλαδή ο υπολογιζόμενος κίνδυνος είναι μεγαλύτερος του πραγματικού.

Γενετικές επιπτώσεις ονομάζονται εκείνες που μπορούν να εμφανισθούν στους απογόνους ατόμων που εκτέθηκαν σε ραδιενέργεια. Οφείλονται σε μεταλλάξεις που είχαν δημιουργηθεί στο DNA κυττάρων των ωοθηκών ή των όρχεων των γονέων τους και οι οποίες μέσω των ωαρίων, ή των σπερματοζωαρίων αντιστοίχως, μεταβιβάστηκαν στους απογόνους. Η εκτίμηση της διακινδύνευσης όσον αφορά στις γενετικές επιπτώσεις γίνεται με βάση τις τρεις υποθέσεις που αναφέρθηκαν για τις καθυστερημένες σωματικές επιπτώσεις. Ο λόγος είναι ότι και στις δυο περιπτώσεις το κύριο γενεσιουργό αίτιο είναι το ίδιο: οι επαγόμενες μεταλλάξεις στο DNA.

Πειραματικές έρευνες όμως που έγιναν για τη διερεύνηση των γενετικών επιπτώσεων σε ποντίκια δείχνουν ότι:

- Παρατηρήσιμες γενετικές επιπτώσεις υπήρξαν μόνο για μεγάλες συσσωρευμένες δόσεις και ρυθμούς δόσεων μεγαλύτερους από 0.01 mSv ανά λεπτό. Αυτός ο ρυθμός δόσης αντιστοιχεί σε 5 Sv ανά έτος, ενώ η μέση δόση από τη φυσική ακτινοβολία (υπόβαθρο) είναι της τάξης περίπου των 2 mSv ανά έτος.
- Η συχνότητα εμφάνισης γενετικών επιπτώσεων παρουσιάζει σημαντική εξάρτηση από το ρυθμό της δόσης. Μόνο για πολύ μεγάλους ρυθμούς (0.8 ως 10 mSv ανά λεπτό) η συχνότητα εξαρτάται από τη συσσωρευμένη δόση και μόνο, είναι δηλαδή ανεξάρτητη του ρυθμού της δόσης.

Οι παρατηρήσεις αυτές δείχνουν ότι και στην περίπτωση των γενετικών επιπτώσεων, όπως και στην περίπτωση των καθυστερημένων σωματικών επιπτώσεων, οι υπολογισμοί που γίνονται με βάση τις τρεις υποθέσεις οδηγούν σε υπερεκτίμηση του βιολογικού κινδύνου. Εντούτοις και οι τρεις αυτές υποθέσεις αποτελούν τη βάση επί της οποίας γίνονται οι εκτιμήσεις των πιθανοτήτων των βιολογικών επιπτώσεων από έκθεση σε μικρές δόσεις ακτινοβολίας και προσδιορίζονται τα όρια δόσεων για την προστασία των ανθρώπων. Η περιγραφή των θεσμοθετημένων διεθνώς ορίων δόσεων γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο.

6.5. ΟΡΙΑ ΔΟΣΕΩΝ

Σκοπός των ορίων δόσεων είναι η προστασία των ανθρώπων από τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Παλαιότερα χρησιμοποιείτο ο όρος «επιτρεπόμενα όρια δόσεων», ο οποίος εδώ και πολλά έτη δεν είναι αποδεκτός, διότι υποδηλώνει ότι κάποιες δόσεις «επιτρέπονται» και ενδεχομένως μπορεί να συνεπάγεται εφησυχασμό για όσους λαμβάνουν δόσεις μικρότερες από τα αντίστοιχα όρια. Αυτό δεν πρέπει να συμβαίνει, δεδομένου ότι βασική αρχή ακτινοπροστασίας για οποιαδήποτε πρακτική με ιοντίζουσες ακτινοβολίες είναι:

- **η αρχή της ALARA**(από τα αρχικά του As Low As Reasonably Achievable), σύμφωνα με την οποία οποιαδήποτε δόση, επιπλέον αυτής από φυσική ραδιενέργεια, πρέπει να επιδιώκεται να τηρείται «Τόσο Μικρή Όσο είναι Λογικά Εφικτό» (μετάφραση του ALARA).

Έτσι ο όρος «όρια δόσεων» αναφέρεται σε τιμές ανώτατων ορίων. Οπότε πρέπει να εφαρμόζεται:

- **η αρχή του περιορισμού των δόσεων**, σύμφωνα με την οποία οι δόσεις από ιοντίζουσες ακτινοβολίες, οι επιπλέον των δόσεων από φυσική ραδιενέργεια ,δεν επιτρέπεται να υπερβούν αυτά τα ανώτατα όρια.
- **η αρχή της τεκμηρίωσης**, σύμφωνα με την οποία κάθε δραστηριότητα που συνεπάγεται έκθεση ανθρώπων σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες πρέπει να τεκμηριώνεται ως προς την αναγκαιότητα και το αναμενόμενο όφελος από την έκθεση στην ακτινοβολία. Για παράδειγμα, στη περίπτωση καρκινοπαθούς πρέπει να τεκμηριώνεται ότι οι συνέπειες στην υγεία του ασθενούς, αν δεν ακτινοβοληθεί ο όγκος του καρκίνου, εκτιμώνται ως πολύ σοβαρότερες από ενδεχόμενη διακινδύνευση λόγω της έκθεσης στην ακτινοβολία.

Σημειώνεται ότι στην περίπτωση των ιατρικών εφαρμογών δεν εφαρμόζεται η αρχή του περιορισμού των δόσεων ,αλλά πρέπει να τηρούνται οι αρχές της τεκμηρίωσης και της ALARA.

Πού βασίζονται οι επιστήμονες τις εκτιμήσεις για τον προσδιορισμό των ορίων;

Κατ' αρχήν δεδομένα συσχέτισης δόσεων και βιολογικών επιπτώσεων υπάρχουν για εξαιρετικά μεγάλες δόσεις, όπως από αυτούς που επέζησαν στη Χιροσίμα και το Ναγκασάκι μετά τις ρίψεις των ατομικών βομβών το 1945, από τους ακτινολόγους των πρώτων δεκαετιών του 20^{ου} αιώνα (οπότε δεν ελαμβάνοντο μέτρα ακτινοπροστασίας) και από ασθενείς που εκτέθηκαν σε έντονες ακτινοβολίες για θεραπευτικούς σκοπούς. Για μικρές δόσεις ,της τάξης των ορίων, δεν υπάρχουν παρατηρήσιμες βιολογικές επιπτώσεις. Ακόμα και για δόσεις δεκάδες, ή και εκατοντάδες φορές, μεγαλύτερες από τα ισχύοντα όρια μπορεί να μην υπάρχουν παρατηρήσιμα συμπτώματα. Δεδομένου ότι για μεγάλες δόσεις, όταν μειώνεται η δόση παρατηρείται μείωση των βιολογικών επιπτώσεων, όπως επίσης και μείωση της πιθανότητας εμφάνισης των βλαπτικών βιολογικών επιπτώσεων, οι εκτιμήσεις για τις μικρές δόσεις βασίζονται σε γραμμική επέκταση των επιπτώσεων από τις μεγάλες στις μικρές δόσεις. Τέλος, οδηγό αποτελούν επίσης και οι δόσεις από τη φυσική ραδιενέργεια ,στο περιβάλλον της οποίας έζησε και εξελίχθηκε ο άνθρωπος. Όρια δόσεων υποδεικνύονται κατ' αρχήν από την Διεθνή Επιτροπή για Ραδιολογική Προστασία (International Commission on Radiological Protection). Βάσει αυτών θεσμοθετούνται από τα κράτη κανονισμοί και όρια ακτινοπροστασίας.

Σύμφωνα με την ισχύουσα σχετική νομοθεσία στη χώρα μας και την Ευρωπαϊκή Ένωση, αλλά και διεθνώς, ορίζονται τα όρια για τις εξής τρεις κατηγορίες του πληθυσμού: (α) τους «εκτιθέμενους εργαζομένους», (β) τους «μαθητευόμενους και σπουδαστές» και (γ) το ευρύ «κοινό».

Ως «εκτιθέμενοι εργαζόμενοι» (τους οποίους εφ' εξής θα αποκαλούμε απλά «εργαζόμενους») ορίζονται τα άτομα τα οποία εργάζονται σε πρακτικές με ιοντίζουσες ακτινοβολίες και κατά την εργασία τους ενδέχεται να εκτεθούν σε δόσεις που υπερβαίνουν τα όρια δόσεων στο ευρύ κοινό. Οι χώροι στους οποίους εργάζονται οι «εργαζόμενοι» είναι «ελεγχόμενοι» ή «επιβλεπόμενοι». Ως ελεγχόμενος ορίζεται κάθε χώρος στον οποίο η ετήσια δόση ενδέχεται να υπερβεί τα 6 mSv και ως επιβλεπόμενος κάθε χώρος στον οποίο η ετήσια δόση ενδέχεται να υπερβεί το 1 mSv, αλλά όχι τα 6 mSv.

Καταγράφεται, μεταξύ άλλων, η ραδιενεργός ακτινοβολία σε αυτούς τους χώρους. Επιπλέον, η δόση που λαμβάνει κάθε εργαζόμενος σε ελεγχόμενο χώρο καταγράφονται με ειδικά όργανα (δυσίμετρα) που κάθε εργαζόμενος φέρει επάνω του. Εν ολίγοις, η δόση που λαμβάνει κάθε «εργαζόμενος» σε ελεγχόμενο χώρο είναι, ή πρέπει να είναι, επαρκώς γνωστή και καταχωρημένη σε προσωπικά ενός έκαστου αρχεία. Επιπλέον, η εξέλιξη της υγείας του παρακολουθείται τακτικά. Έτσι είναι ανεκτό το όριο δόσης για τον «εργαζόμενος» να είναι σημαντικά μεγαλύτερο από ό,τι για άτομο του ευρέος κοινού.

«Μαθητευόμενοι και σπουδαστές» είναι οι εκπαιδευόμενοι για επαγγέλματα που συνεπάγονται έκθεση σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες.

Στην κατηγορία του ευρέος κοινού λογίζονται όσοι δεν ανήκουν στις δύο προηγούμενες κατηγορίες. Τα όρια δόσεων διακρίνονται σε όρια που αφορούν «ολόσωμη δόση», δηλαδή δόση σε ολόκληρο το σώμα, και «δόση» σε επί μέρους όργανα του σώματος. Τα θεσμοθετημένα όρια από την εθνική νομοθεσία και την νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι:

α) για τους «εργαζόμενους»:

- 20 mSv κατά τη διάρκεια ενός έτους
- 100 mSv κατά τη διάρκεια 5 συνεχόμενων ετών

Είναι δυνατόν σε εξαιρετικές περιπτώσεις η ενεργός δόση κατά την διάρκεια ενός μεμονωμένου έτους να φτάσει τα 50 mSv, με την προϋπόθεση ότι τα πέντε προηγούμενα συνεχόμενα έτη, συμπεριλαμβανομένου και του τρέχοντος, η ενεργός δόση δεν έχει υπερβεί τα 100 mSv.

Μόλις δηλώνεται εγκυμοσύνη από εργαζόμενη γυναίκα, πρέπει να λαμβάνονται μέτρα, ώστε η έκθεση της στο επαγγελματικό περιβάλλον να είναι τόση, ώστε η προς το έμβρυο ισοδύναμη δόση που αθροίζεται κατά το χρονικό διάστημα μεταξύ της δηλώσεως της εγκυμοσύνης και του τοκετού, να είναι τόσο χαμηλή όσο είναι λογικά εφικτό και να μην υπερβαίνει σε οποιαδήποτε περίπτωση το 1 mSv.

β) για τους «μαθητευόμενους και σπουδαστές»:

- ηλικίας άνω των 18 ετών: Τα όρια δόσεων είναι τα ίδια με εκείνα των εργαζομένων
- ηλικίας 16 έως 18 ετών: 6 mSv κατά τη διάρκεια ενός έτους

γ) για μεμονωμένα άτομα του «εύρους κοινού»:

- 1 mSv κατά τη διάρκεια ενός έτους

Ως μέτρο σύγκρισης αναφέρεται ότι η παγκόσμια μέση ετήσια τιμή ολόσωμης δόσης από φυσική ραδιενέργεια είναι 2.5 mSv. Τονίζεται ότι τα όρια δόσεων αφορούν στις δόσεις επιπλέον της δόσης από φυσική ραδιενέργεια.

Εκτός από τα όρια ολόσωμης δόσης καθορίζονται και τα όρια ενεργού δόσης για επί μέρους όργανα. Π.χ. για το ευρύ κοινό το όριο της ενεργού δόσης είναι 15 mSv ανά έτος για το φακό των οφθαλμών και 50 mSv για το δέρμα, ενώ για τους «εργαζόμενους» τα αντίστοιχα ετήσια όρια είναι 150 mSv για το φακό των οφθαλμών και 500 mSv για το δέρμα.

Με βάση τα προαναφερθέντα όρια προκύπτουν απλά παράγωγα όρια για διάφορα μεγέθη ραδιενέργειας, όπως π.χ.

- Όρια του εξωτερικού ρυθμού έκθεσης
- Όρια για τη συγκέντρωση συγκεκριμένων ραδιενεργών ισότοπων στον αέρα, τα οικοδομικά υλικά κ.α.

για κάθε ραδιενεργό ισότοπο όρια ετήσιας πρόσληψης δια της αναπνευστικής και τροφικής οδού.

Τονίζεται ότι το σύνολο των ορίων αυτών έχει εφαρμογή μόνο για τις δόσεις από πηγές που δεν ανήκουν στην φυσική ραδιενέργεια, ή για δραστηριότητες που επιφέρουν τεχνητή αύξηση της φυσικής ραδιενέργειας. Δηλαδή οι δόσεις από τη φυσική ραδιενέργεια δεν προσμετρώνται στην εκτίμηση διακινδύνευσης. Εν τούτοις σε ορισμένες χώρες, στις οποίες παρατηρούνται αυξημένα επίπεδα φυσικής ραδιενέργειας σε κατοικίες ή τους χώρους εργασίας, διερευνάται η σκοπιμότητα λήψης μέτρων και θέσπισης κανονισμών και για τη φυσική ραδιενέργεια.

6.6. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ

Έτσι ότι η ροή μονοενεργειακών φωτονίων ενέργειας E σε κάποια θέση υλικού είναι Φ φωτόνια/cm²/s. Ο ρυθμός εναπόθεσης ενέργειας ανά μονάδα όγκου (ενέργεια/cm³/s) του υλικού είναι:

$$\dot{W} = \mu_a E \Phi \quad [6.15]$$

Όπου:

μ_a = ο γραμμικός συντελεστής απορρόφησης του υλικού.

Ο ρυθμός εναπόθεσης ενέργειας ανά μονάδα μάζας (ενέργεια/kg/s) του υλικού είναι:

$$\dot{Y} = \frac{\dot{W}}{\rho} = \frac{\mu_a}{\rho} E \quad [6.16]$$

Όπου:

ρ = η πυκνότητα και

μ_a/ρ = ο μαζικός συντελεστής απορρόφησης του υλικού. Ο μ_a είναι συνάρτηση της ενέργειας E των φωτονίων.

Αν λοιπόν γνωρίζουμε τη ροή Φ , μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια που εναποθέτουν τα μονοενεργειακά φωτόνια, π.χ. σε βιολογικό ιστό μπορούμε συνεπώς να υπολογίσουμε την αντίστοιχη δόση σε Gy. Η περίπτωση ακτινοβόλησης με μονοενεργειακά φωτόνια είναι πολύ σπάνια στην πράξη. Στο σύνολο σχεδόν των περιπτώσεων τα υλικά εκτίθενται σε ακτινοβολία σωματιδίων με κάποιο φάσμα ενέργειας.

Η θωράκιση παρεμβάλλεται μεταξύ της πηγής της ραδιενεργού ακτινοβολίας και των υλικών (βιολογικοί ιστοί, μηχανήματα) που πρέπει να προστατευτούν από την ακτινοβολία. Το ζητούμενο εδώ είναι η επιλογή του υλικού της θωράκισης και ο υπολογισμός του πάχους της, ώστε η δόση πίσω από τη θωράκιση να είναι μικρότερη από προκαθορισμένα όρια.

$$I_x = I_0 e^{-\mu x} \quad [6.17]$$

Όπου:

μ = ο γραμμικός συντελεστής εξασθένισης του υλικού της θωράκισης.

Εκτός από τα παρθένα, φτάνουν στη θέση A και άλλα φωτόνια, προϊόντα της αλληλοεπίδρασης των φωτονίων της προσπίπτουσας δέσμης με το υλικό της θωράκισης. Φτάνουν π.χ. φωτόνια που προέκυψαν από σκεδάσεις Compton φωτονίων της προσπίπτουσας

δέσμης και, σε μικρότερο ποσοστό, από εξάυλωση ποζιτρονίων που προέκυψαν από δίδυμο γένεση. Όλα τα μη-παρθένα φωτόνια φτάνουν στο A με ενέργεια E μικρότερες από την ενέργεια E_0 των παρθένων. Έτσι, ενώ η προσπίπτουσα δέσμη είναι μονοενεργειακή, πίσω από τη θωράκιση θα υπάρχουν φωτόνια με διάφορες ενέργειες $E < E_0$. Δηλαδή, θα υπάρχει συνεχώς φάσμα $S(E)$ ενέργειας των φωτονίων, όπως αυτό του σχήματος 7.6.1. Το μέγεθος $S(E) dE$ δίδει το ποσοστό φωτονίων με ενέργεια στη γειτονιά dE της E. Επίσης, δεν υπάρχει δέσμη φωτονίων στη θέση A, διότι εκεί υπάρχουν φωτόνια κινούμενά προς διάφορες κατευθύνσεις. Η ροή φωτονίων, δηλαδή το μέγεθος $\Phi(E) dE$, δίνει τον αριθμό φωτονίων με ενέργεια στη γειτονιά dE της E, που διασχίζουν (κινούμενα προς διάφορες κατευθύνσεις) τη μονάδα επιφάνειας στη θέση A ανά μονάδα χρόνου (μονάδες της Φ : φωτόνια·cm⁻²·eV⁻¹). Ο ρυθμός $d\dot{W}$ εναπόθεσης ενέργειας ανά μονάδα όγκου του υλικού από τα φωτόνια ενέργειας E είναι:

$$d\dot{W} = \mu_a(E) E \Phi(E) dE \quad [6.18]$$

όπου:

$\mu_a(E)$ = ο γραμμικός συντελεστής απορρόφησης του υλικού που βρίσκεται στη θέση A.

Ο ρυθμός εναπόθεσης ενέργειας ανά μονάδα μάζας του υλικού από τα φωτόνια ενέργειας E είναι:

$$d\dot{Y} = \frac{\mu_a(E)}{\rho} E \Phi(E) dE \quad [6.19]$$

Όπου:

ρ = η πυκνότητα υλικού που βρίσκεται στη θέση A.

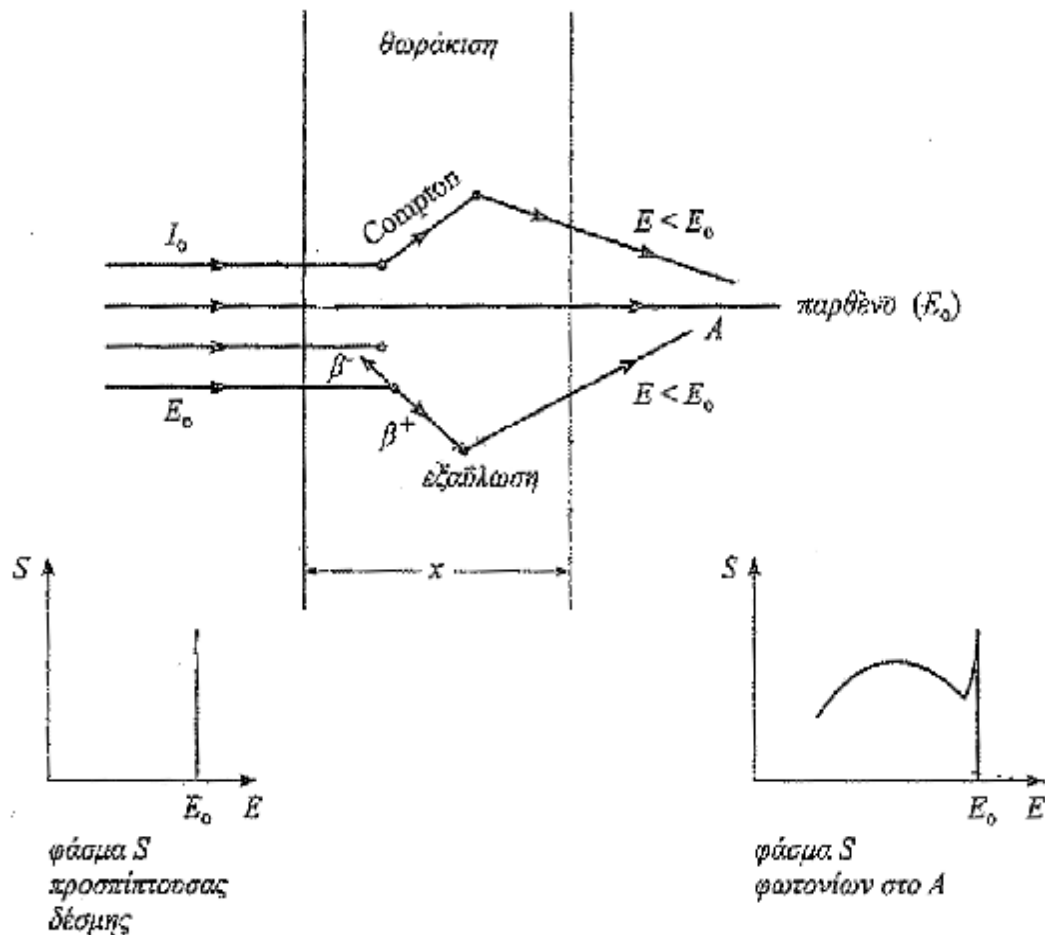
Άρα η συνολική ενέργεια που εναποτίθεται ανά μονάδα μάζας του υλικού, ανά μονάδα χρόνου, από όλα τα φωτόνια που φτάνουν στη θέση A είναι:

$$\dot{Y} = \int_0^E \frac{\mu_a(E)}{\rho} E \Phi(E) dE \quad [6.20]$$

Για τον υπολογισμό της $\Phi(E)$ είναι απαραίτητη η επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς (εξίσωση Boltzmann) φωτονίων. Ενώ αυτό είναι εφικτό σε απλές γεωμετρίες, όπως αυτή της άπειρης πλάκας και δέσμης φωτονίων (Σχήμα 7.15), είναι εξαιρετικά δύσκολο σε ρεαλιστικές γεωμετρίες θωράκισης και κατανομής πηγών. Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιούνται αριθμητικές προσεγγιστικές επιλύσεις που πραγματοποιούνται με μεγάλα προγράμματα σε μεγάλους ηλεκτρονικούς υπολογιστές.

Για απλές γεωμετρίες χρησιμοποιείται η έννοια του συντελεστή ανοικοδόμησης που ορίζεται ακολούθως. Η ενέργεια που εναποθέτουν τα παρθένα φωτόνια στη θέση A (Σχήμα 7.15) είναι:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{\Pi} &= \frac{\mu_a(E_0)}{\rho} E_0 I_{\Pi} = \\ &= \frac{\mu_a(E_0)}{\rho} E_0 I_0 e^{-\mu x} \end{aligned} \quad [6.21]$$



Σχήμα 15: Στο σημείο A φτάνουν, εκτός από τα παρθένα φωτόνια με ενέργεια $E < E_0$

Ο συντελεστής ανοικοδόμησης (buildupfactor) B ορίζεται από τη σχέση:

$$B(\mu x, E_0) \equiv \frac{\dot{Y}}{\dot{Y}_0} \quad [6.22]$$

Όπου σημειώνεται ότι ο συντελεστής ανοικοδόμησης B εξαρτάται από:

- το πάχος « μx » της θωράκισης (το μέγεθος μx δίνει το πάχος της θωράκισης ανοιγμένο στο μήκος $\lambda = 1/\mu$ της μέσης ελεύθερης διαδρομής των φωτονίων)
- την ενέργεια E_0 των φωτονίων που προσπίπτουν στη θωράκιση.

Ο B εξαρτάται ακόμα από:

- τη γεωμετρία της πηγής (π.χ. σημειακή, γραμμική, επίπεδη, κατανεμημένη κ.λ.π.)
- τη γεωμετρία της θωράκισης.

Τιμές του συντελεστή ανοικοδόμησης για παράλληλη δέσμη φωτονίων και άπειρη πλακοειδή θωράκιση (Σχήμα 15) δίνονται στον Πίνακα 12 Από τον ορισμό [6.22] προκύπτει:

$$Y=B(\mu x, E_0) \frac{\mu \alpha(E_0)}{\rho} E_0 I \pi =$$

$$=B(\mu x, E_0) \frac{\mu \alpha(E_0)}{\rho} E_0 I_0 e^{-\mu x}$$
[6.23]

Τονίζεται ότι το μ είναι ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης του υλικού της θωράκισης, ενώ μ_a/ρ είναι ο μαζικός συντελεστής απορρόφησης του υλικού που βρίσκεται στο σημείο A.

Έστω τώρα ότι σημειακή πηγή φωτονίων ενέργειας E_0 περιβάλλεται από σφαιρική θωράκιση ακτίνας r . Στην περίπτωση σημειακής ισοτροπικής πηγής σε άπειρο μέσο μπορεί να δείξει κανείς εύκολα ότι η ένταση των παρθένων φωτονίων σε απόσταση r από την πηγή είναι:

$$I_{\pi} = \frac{S_0}{4\pi r^2} e^{-\mu r}$$
[6.24]

Όπου:

S_0 = η ένταση (φωτόνια/s) της πηγής και μ ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης του μέσου (της θωράκισης).

Ο Πίνακας 12 δίδει τις τιμές του συντελεστή ανοικοδόμησης B για σφαιρική θωράκιση. Στην εξωτερική επιφάνεια r της σφαιρικής θωράκισης είναι:

$$\dot{Y} = B(\mu r, E_0) \frac{\mu \alpha(E_0)}{\rho} E_0 I_{\pi} =$$

$$= B(\mu r, E_0) \frac{\mu \alpha(E_0)}{\rho} E_0 \frac{S_0}{4\pi r^2} e^{-\mu r}$$
[6.25]

Σημειώνεται και πάλι ότι ο μ αναφέρεται στο υλικό της θωράκισης, ενώ ο μ_a/ρ αναφέρεται στο υλικό που δέχεται την ακτινοβολία που διαπερνά τη θωράκιση. E_0 είναι η ενέργεια των φωτονίων της πηγής.

Στους υπολογισμούς είναι χρήσιμο να έχει κανείς μαθηματική έκφραση του συντελεστή ανοικοδόμησης B . Οι πιο γνωστές εμπειρικές εκφράσεις, προσαρμοσμένες στα δεδομένα του Goldstein (Πίνακες 13 και 14), είναι οι εξής:

- a. Η γραμμική σχέση είναι η λιγότερο ακριβής και δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για θωρακίσεις μεγάλου πάχους και δίνεται από:

$$B(\mu r) = 1 + k \cdot (\mu r)$$
[6.24]

Η σταθερά k είναι $k = B - 1$.

- b. Ο τύπος του Berger

$$B(\mu r) = 1 + a \mu r e^{b \mu r}$$
[6.25]

Τιμές των σταθερών a και b δίνονται σε εγχειρίδια θωράκισης

- c. Ο τύπος του Caro έχει το πλεονέκτημα ότι περιλαμβάνει την ενέργεια E_0 των φωτονίων και δίνεται ως εξής:

$$B(\mu r, E_0) = \sum_{i=0}^3 \beta_i (\mu r)^i \quad [6.26]$$

$$\beta_i = \sum_{j=0}^4 c_{ij} \left(\frac{1}{E_0}\right)^j$$

Τιμές των σταθερών c_{ij} δίνονται στα εγχειρίδια θωράκισης
 Η πιο δημοφιλής σχέση είναι αυτή του Taylor:

$$B(\mu r) = A \exp(-a_1 \mu r) + (1 - A) \exp(-a_2 \mu r) \quad [6.27]$$

Τιμές των σταθερών A , a_1 και a_2 δίνονται στον Πίνακα 15.

Οι σχέσεις που διατυπώθηκαν εδώ δίδουν ικανοποιητικά αποτελέσματα για απλούς υπολογισμούς θωράκισης, όπως π.χ. αυτούς που χρειάζονται στις περισσότερες περιπτώσεις θωράκισης σημειακών πηγών στο εργοστάσιο. Το γενικό όμως πρόβλημα της θωράκισης, π.χ. της καρδιάς των αντιδραστήρων, αποτελεί ιδιαίτερο αντικείμενο σπουδής και έρευνας.

Ας σημειώσουμε εδώ ότι ο προσδιορισμός του συντελεστή ανοικοδόμησης, στην περίπτωση που υπάρχουν διαδοχικά στρώματα διαφόρων υλικών θωράκισης, είναι διαφορετικός από τον προσδιορισμό B ομογενούς θωράκισης που περιγράφηκε προηγουμένως. Ο B εξαρτάται από τη σειρά διαδοχής των στρωμάτων. Για παράδειγμα, ο B θα είναι διαφορετικός στις εξής δύο περιπτώσεις στρωμάτων νερού και μόλυβδου:

- (α) αν προηγείται το στρώμα μόλυβδου και έπεται το στρώμα του νερού
- (β) αν προηγείται το στρώμα του νερού και έπεται το στρώμα του μόλυβδου.

Στοιχειώδης περιγραφή του προβλήματος με παραδείγματα διαφόρων γεωμετριών πηγής και απλά παραδείγματα θωράκισης με πολλαπλά διαδοχικά στρώματα υλικών δίνονται στο βιβλίο του LAmarsch (1977). Λεπτομερειακή παρουσίαση των υπολογιστικών μεθόδων θωράκισης δίνεται στο βιβλίο του Wood (1982).

Όπως είδαμε, η εμβέλεια των σωματιδίων α και β είναι μικρή σε σύγκριση με την εμβέλεια των φωτονίων και νετρονίων. Έτσι, θωράκιση ικανή να εξασθενίσει την ακτινοβολία γ και τα νετρόνια είναι συνήθως περισσότερο από επαρκής για την απαιτούμενη εξασθένιση των άλλων ακτινοβολιών που εκπέμπει η πηγή.

Η έννοια του συντελεστή ανοικοδόμησης μπορεί κατ' αρχήν να εφαρμοστεί και για τους υπολογισμούς θωράκισης από νετρόνια. Σε αυτήν όμως την περίπτωση είναι λιγότερο επιτυχής από ότι σε υπολογισμούς θωράκισης από ακτινοβολία γ .

Υλικό	E ₀		μΧ				
	MeV	1	2	4	7	10	15
Νερό	0.5	2.63	4.29	9.05	20.0	35.9	74.9
	1.0	2.26	3.39	6.27	11.5	18.0	30.8
	2.0	1.84	2.63	4.28	6.96	9.87	14.4
	3.0	1.69	2.31	3.57	5.51	7.48	10.8
	4.0	1.58	2.10	3.12	4.63	6.19	8.54
	6.0	1.45	1.86	2.63	3.76	4.86	6.78
	8.0	1.36	1.69	2.30	3.16	4.00	5.47
Σίδηρος	0.5	2.07	2.94	4.87	8.31	12.4	20.6
	1.0	1.92	2.74	4.57	7.81	11.6	18.9
	2.0	1.69	2.35	3.76	6.11	8.78	13.7
	4.0	1.48	1.90	2.95	4.61	6.46	9.92
	6.0	1.35	1.71	2.48	3.81	5.35	8.39
	8.0	1.27	1.55	2.17	3.27	4.58	7.33
	10.0	1.22	1.44	1.95	2.89	4.07	6.70
Κα/τερος	1.0	1.65	2.24	3.40	5.18	7.19	10.5
	2.0	1.58	2.13	3.27	5.12	7.13	11.0
	4.0	1.39	1.80	2.69	4.31	6.30	
	6.0	1.27	1.57	2.27	3.72	5.77	11.0
	10.0	1.16	1.33	1.77	2.81	4.53	9.68
Μόλ/δος	0.5	1.24	1.39	1.63	1.87	2.08	
	1.0	1.38	1.68	2.18	2.80	3.40	4.20
	2.0	1.40	1.76	2.41	3.36	4.35	5.94
	3.0	1.36	1.71	2.42	3.55	4.82	7.18
	4.0	1.28	1.56	2.18	3.29	4.69	7.70
	6.0	1.19	1.40	1.87	2.97	4.69	9.53
	8.0	1.14	1.30	1.69	2.61	4.18	9.08
	10.0	1.11	1.24	1.54	2.27	3.54	7.70
Ουράνιο	0.5	1.17	1.28	1.45	1.60	1.73	
	1.0	1.30	1.53	1.90	2.32	2.70	3.60
	2.0	1.33	1.62	2.15	2.87	3.56	4.89
	3.0	1.29	1.57	2.13	3.02	3.99	5.94
	4.0	1.25	1.49	2.02	2.94	4.06	6.47
	6.0	1.18	1.37	1.82	2.74	4.12	7.79
	8.0	1.13	1.27	1.61	2.39	3.65	7.36
	10.0	1.10	1.21	1.48	2.12	3.21	6.58

Πίνακας 13: Συντελεστής ανοικοδόμησης για παράλληλη δέσμη φωτονίων και άπειρη πλακοειδή θωράκιση

Υλικό	E ₀	μg						
	MeV	1	2	4	7	10	15	20
Νερό	0.225	3.09	7.14	23.0	72.9	166	456	982
	0.5	2.52	5.14	14.3	38.8	77.6	178	334
	1.0	2.13	3.71	7.68	16.2	27.1	50.4	82.2
	2.0	1.83	2.77	4.88	8.46	12.4	19.5	27.7
	3.0	1.69	2.42	3.91	6.23	8.63	12.8	17.0
	4.0	1.58	2.17	3.34	5.13	6.94	9.97	12.9
	6.0	1.46	1.91	2.76	3.99	5.18	7.09	8.85
	8.0	1.38	1.74	2.40	3.34	4.25	5.66	6.95
Αλουμίνιο	10.0	1.33	1.63	2.19	2.97	3.72	4.90	5.98
	0.5	1.98	3.09	5.98	11.7	19.2	35.4	55.6
	1.0	1.87	2.89	5.39	10.2	16.2	28.3	42.7
	2.0	1.76	2.43	4.13	7.25	10.9	17.6	25.1
	3.0	1.55	2.15	3.51	5.85	8.51	13.5	19.1
	4.0	1.45	1.94	3.03	4.91	7.11	11.2	16.0
	6.0	1.34	1.72	2.58	4.14	6.02	9.89	14.7
	8.0	1.27	1.56	2.23	3.49	5.07	8.50	13.0
Σίδηρος	10.0	1.20	1.42	1.95	2.99	4.35	7.54	12.4
	0.5	1.98	3.09	5.98	11.7	19.2	35.4	55.6
	1.0	1.87	2.89	5.39	10.2	16.2	28.3	42.7
	2.0	1.76	2.43	4.13	7.25	10.9	17.6	25.1
	3.0	1.55	2.15	3.51	5.85	8.51	13.5	19.1
	4.0	1.45	1.94	3.03	4.91	7.11	11.2	16.0
	6.0	1.34	1.72	2.58	4.14	6.02	9.89	14.7
	8.0	1.27	1.56	2.23	3.49	5.07	8.50	13.0
Κασ/ερος	10.0	1.20	1.42	1.95	2.99	4.35	7.54	12.4
	0.5	1.56	2.08	3.09	4.57	6.04	8.64	
	1.0	1.64	2.30	3.74	6.17	8.85	13.7	18.8
	2.0	1.57	2.17	3.53	5.87	8.53	13.6	19.3
	3.0	1.46	1.96	3.13	5.28	7.91	13.3	20.1
	4.0	1.38	1.81	2.82	4.82	7.41	13.2	21.2
	6.0	1.26	1.57	2.37	4.17	6.94	14.8	29.1
	8.0	1.19	1.42	2.05	3.57	6.19	15.1	34.0
Βολφ/μιο	10.0	1.14	1.31	1.79	2.99	5.21	12.5	33.4
	0.5	1.28	1.50	1.84	2.24	2.61	3.12	7.35
	1.0	1.44	1.83	2.57	3.62	4.64	6.25	10.6
	2.0	1.42	1.85	2.72	4.09	5.27	8.07	14.1
	3.0	1.36	1.74	2.59	4.00	5.92	9.66	20.0
	4.0	1.29	1.62	2.41	4.03	6.27	12.0	36.3
	6.0	1.20	1.43	2.07	3.60	6.29	15.7	41.9
	8.0	1.14	1.32	1.81	3.05	5.40	15.2	39.3
Μόλυβδος	10.0	1.11	1.25	1.64	2.62	4.65	14.0	2.73
	0.5	1.24	1.42	1.69	2.00	2.27	2.65	2.73
	1.0	1.37	1.69	2.26	3.02	3.74	4.81	5.86
	2.0	1.39	1.76	2.51	3.66	4.84	6.87	9.00
	3.0	1.34	1.68	2.43	3.75	5.30	8.44	12.3
	4.0	1.27	1.56	2.25	3.61	5.44	9.80	16.3
	5.1	1.21	1.46	2.08	3.44	5.55	11.7	23.6
	6.0	1.18	1.40	1.97	3.34	5.69	13.8	32.7
Θυράνιο	8.0	1.14	1.30	1.74	2.89	5.07	14.1	44.6
	10.0	1.11	1.23	1.58	2.52	4.34	12.5	39.2
	0.5	1.17	1.30	1.48	1.67	1.85	2.08	
	1.0	1.31	1.56	1.98	2.50	2.97	3.67	
	2.0	1.33	1.64	2.23	3.09	3.95	5.36	6.48
	3.0	1.29	1.58	2.21	3.27	4.51	6.97	9.88
	4.0	1.24	1.50	2.09	3.21	4.66	8.01	12.7
	6.0	1.16	1.36	1.85	2.96	4.80	10.8	23.0
8.0	1.12	1.27	1.66	2.61	4.36	11.2	28.0	
10.0	1.09	1.20	1.51	2.26	3.78	10.5	28.5	

Πίνακας 14: Συντελεστής ανοικοδόμησης για σημειακή πηγή φωτονίων και σφαιρική θωράκιση

Υλικό	Ενέργεια (MeV)	A	a1	a2
Νερό	0.5	100.845	0.12687	-0,10925
	1.0	19.601	0.09037	-0,02522
	2.0	12.612	0.05320	-0,01932
	3.0	11.110	0.03550	0.03206
	4.0	11.163	0.02543	0.03025
	6.0	8.385	0.01820	0.04164
	8.0	4.635	0.02633	0.07097
	10.0	3.545	0.02991	0.08717
Μπετόν	0.5	38.225	0.14824	-0,10579
	1.0	25.507	0.07230	-0,01843
	2.0	18.089	0.04250	0.00849
	3.0	13.640	0.03200	0.02022
	4.0	11.460	0.02600	0.02450
	6.0	10.781	0.01520	0.02925
	8.0	8.972	0.01300	0.02979
	10.0	4.015	0.02880	0.06844
Αλουμίνιο	0.5	38.911	0.10015	-0,06312
	1.0	28.782	0.06820	-0,02973
	2.0	16.981	0.04588	0.00271
	3.0	10.583	0.04066	0.02514
	4.0	7.526	0.03973	0.03860
	6.0	5.713	0.03934	0.04347
	8.0	4.716	0.03837	0.04431
	10.0	3.999	0.03900	0.04130
Σίδηρος	0.5	31.379	0.06842	-0,03742
	1.0	24.957	0.06086	-0,00526
	2.0	17.622	0.04627	-0,00526
	3.0	13.218	0.04431	-0,00087
	4.0	9.624	0.04698	0.00175
	6.0	5.867	0.06150	-0,00186
	8.0	3.243	0.07500	0.02123
	10.0	1.747	0.09900	0.06627
Κασ/ερος	0.5	11.440	0.01800	0.03187
	1.0	11.426	0.04266	0.01505
	2.0	8.783	0.05349	0.01505
	3.0	5.400	0.07440	0.02080
	4.0	3.496	0.09517	0.02598
	6.0	2.005	0.13733	-0,01501
	8.0	1.101	0.17288	-0,01787
	10.0	0.708	0.19200	0.01552
Μόλυβδος	0.5	1.677	0.03084	0.30941
	1.0	2.984	0.03503	0.13486
	2.0	5.421	0.03482	0.13486
	3.0	5.580	0.05422	0.00611
	4.0	3.897	0.08468	-0,02383
	6.0	0.926	0.17860	-0,04635
	8.0	0.368	0.23691	-0,05864
	10.0	0.311	0.24024	-0,02783

Πίνακας 15: Τιμές των παραμέτρων του τύπου του Taylor

7. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΩΝ ΚΑΤΑΛΟΙΠΩΝ

Οι κατηγορίες των ραδιενεργών καταλοίπων ορίζονται στο κεφάλαιο 7.1. Στο κεφάλαιο 7.2 περιγράφεται η βραχυπρόθεσμη διαχείριση καθώς και οι πολιτικές διαχείρισης ραδιενεργών καταλοίπων. Η μακροπρόθεσμη διαχείριση περιγράφεται στο κεφάλαιο 7.3.

7.1. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΩΝ ΚΑΤΑΛΟΙΠΩΝ

Ραδιενεργά κατάλοιπα θεωρούνται τα υλικά που περιέχουν αξιόλογη ποσότητα ραδιενεργών ισοτόπων, έχουν προκύψει από χρήση ραδιενεργών υλικών και μετά από αυτήν τη χρήση δεν θεωρούνται πλέον χρήσιμα. Διακρίνονται σε χαμηλού επιπέδου, ενδιάμεσου επιπέδου και υψηλού επιπέδου κατάλοιπα, με κριτήρια την ποσότητα και το είδος της ραδιενέργειας, καθώς και τους αναμενόμενους χρόνους επιβίωσης των ραδιενεργών ισοτόπων που περιέχουν. Υπενθυμίζεται ότι βασικό χαρακτηριστικό της ραδιενέργειας είναι ότι μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, ιδιότητα που διακρίνει τα ραδιενεργά από τα άλλα, π.χ. τα χημικά, κατάλοιπα. Τα ραδιενεργά ισότοπα καταλήγουν εν τέλει, μέσω της διάσπασης, σε ευσταθή μη ραδιενεργά ισότοπα.

Χαμηλού επιπέδου κατάλοιπα: παράγονται από τις εφαρμογές της πυρηνικής τεχνολογίας στην υγεία, στα ερευνητικά και άλλα εργαστήρια και τη βιομηχανία, καθώς και από την πυρηνική βιομηχανία. Συνίσταται από χαρτιά, εργαλεία, μπουκάλια, ρουχισμό, φίλτρα και άλλα, τα οποία περιέχουν μικρές ποσότητες κυρίως βραχύβιων ραδιοισοτόπων. Η διαχείριση τους δεν είναι επικίνδυνη, αλλά η απόρριψη τους στο περιβάλλον πρέπει να γίνεται με περισσότερη προσοχή σε σχέση με τα κοινά απορρίμματα. Προκειμένου να μειωθεί ο όγκος τους, συχνά τα μιν στερεά συμπιέζονται, τα δε υγρά αποξηραίνονται σε κατάλληλες εγκαταστάσεις. Στη συνέχεια τοποθετούνται σε δοχεία, τα οποία είτε (α) φυλάσσονται σε κατάλληλους επιβλεπόμενους χώρους, μέχρις ότου το επίπεδο ραδιενέργειας πέσει κάτω από ορισμένα θεσμοθετημένα από εθνικές νομοθεσίες ασφαλή όρια, οπότε αντιμετωπίζονται ως κοινά σκουπίδια και απορρίπτονται ως τέτοια, είτε (β) θάβονται σε μικρό βάθος στη γη σε επιβλεπόμενες περιοχές. Εκτιμάται ότι παγκοσμίως αποτελούν το 90% του συνολικού όγκου όλων των ραδιενεργών καταλοίπων, αλλά ότι περιέχουν μόνον το 1% της ραδιενέργειας του συνόλου των καταλοίπων.

Ενδιάμεσου επιπέδου κατάλοιπα: είναι αυτά που περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες ραδιενέργειας και που ενδεχομένως χρειάζονται θωράκιση. Περιλαμβάνουν ραδιενεργά υλικά, π.χ. ρητίνες, χημικά υγρά, εξαντλημένες ραδιενεργές πηγές από ιατρικές και βιομηχανικές χρήσεις, αντικείμενα από αντιδραστήρες και άλλα. Τέτοια κατάλοιπα ενδέχεται να κλειστούν σε θωράκιση τσιμέντου ή, αν πρόκειται για υγρά, να εμποτιστούν σε τσιμέντο πριν από τη φύλαξη ή την εναπόθεση σε επιβλεπόμενους χώρους. Εκτιμάται ότι παγκοσμίως αποτελούν το 7% του συνολικού όγκου όλων των ραδιενεργών καταλοίπων και ότι περιέχουν μόνο 4% της ραδιενέργειας του συνόλου των καταλοίπων.

Υψηλού επιπέδου κατάλοιπα: θεωρούνται τα μεγάλης ραδιενέργειας προϊόντα της σχάσης και κάποια βαρέα μακρόβια ραδιενεργά ισότοπα παραγόμενα στους αντιδραστήρες. Παράγουν σημαντικές ποσότητες θερμότητας από τη διάσπαση των ραδιονουκλιδίων, οπότε απαιτείται ψύξη και ειδική θωράκιση κατά τον χειρισμό και τη μεταφορά τους. Τα υπόλοιπα του κεφαλαίου αφιερώνεται σε αυτά τα κατάλοιπα, διότι το ζήτημα της ασφαλούς μακροχρόνιας διαχείρισής τους είναι αμφιλεγόμενο, προβάλλεται έντονα από τους αντιτιθέμενους στην βιομηχανική χρήση της πυρηνικής ενέργειας και συνιστά τα σημαντικότερο ίσως πρόβλημα της πυρηνικής ηλεκτροπαραγωγής.

7.2. ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΗ ΚΑΙ ΜΕΣΟΠΡΟΘΕΣΜΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΚΑΤΑΛΟΙΠΩΝ

Όπως είδαμε, πολλά από τα προϊόντα της σχάσης είναι ραδιενεργά. Επί πλέον, στον αντιδραστήρα παράγονται, με απορρόφηση νετρονίων από τα ισότοπα του ουρανίου, τα ονομαζόμενα υπερουράνια ισότοπα, τα οποία είναι και αυτά ραδιενεργά. Τα κύρια υπερουράνια στοιχεία που παράγονται στο πυρηνικό καύσιμο είναι ισότοπα του πλουτωνίου, του νεπτουνίου και του αμερικού, που είναι άκρως μακρόβια με μεγάλους χρόνους ημιζωής. Η ραδιενέργεια τους εξασθενεί σε χρονική κλίμακα παρόμοια με αυτήν των ισωτόπων του ουρανίου. Έτσι, ενώ για την εξασθένιση της ραδιενέργειας των προϊόντων της σχάσης σε ανεκτά επίπεδα επαρκούν ενδεχομένως μερικές χιλιάδες έτη, η παρουσία των υπερουρανίων καθιστά απαραίτητη την ασφαλή διαχείριση των ραδιενεργών καταλοίπων από τον πυρηνικό καύσιμο επί πολύ μεγαλύτερα διαστήματα.

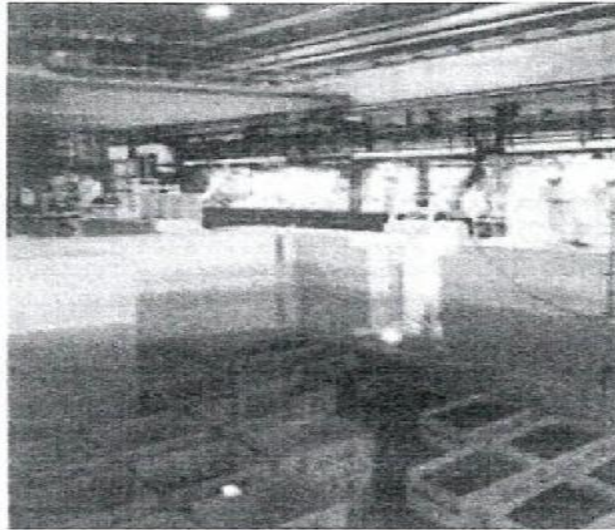
Κατά τη λειτουργία του αντιδραστήρα το ποσοστό του σχάσιμου U-235 στο πυρηνικό καύσιμο μειώνεται, καθώς το U-235 καταστρέφεται με τις σχάσεις. Ταυτόχρονα αυξάνεται η ποσότητα των προϊόντων της σχάσης και των υπερουρανίων στοιχείων. Όσο περισσότερο παραμένει το καύσιμο στο εν λειτουργία αντιδραστήρα, όσο δηλαδή περισσότερη ενέργεια παράγει, τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση του ποσοστού του επιβιώσαντος U-235 και τόσο περισσότερη η ποσότητα των προϊόντων της σχάσης και των υπερουρανίων.

Ωστε, με την λειτουργία του αντιδραστήρα όχι μόνον μειώνεται το ποσοστό του σχάσιμου υλικού, αλλά και προστίθενται απορροφητές νετρονίων, κυρίως τα προϊόντα της σχάσης. Όταν το ποσοστό του σχάσιμου υλικού μειωθεί κάτω από κάποια τιμή, το πυρηνικό καύσιμο δεν επαρκεί για να διατηρήσει κρίσιμο τον αντιδραστήρα στην επιθυμητή ισχύ και πρέπει να εξαχθεί από την καρδιά και να αντικατασταθεί από νέο καύσιμο. Στην κατάσταση αυτή ονομάζεται **εξαντλημένο ή χρησιμοποιημένο καύσιμο**. Είδαμε ότι η μονάδα εισαγωγής ή εξαγωγής καυσίμου στην καρδιά του αντιδραστήρα είναι μια συστάδα καυσίμου. Οι συστάδες του εξαντλημένου καυσίμου, αφού εξαχθούν από την καρδιά, αποθηκεύονται προσωρινά σε δεξαμενή προσωρινής αποθήκευσης λειτουργεί αφ' ενός ως ψυκτικό του χρησιμοποιημένου καυσίμου και αφ' ετέρου ως θωράκιση των ραδιενεργών συστάδων για την προστασία των εργαζομένων.

Υπενθυμίζεται ότι στο χρησιμοποιημένο καύσιμο παράγεται θερμότητα από την διάσπαση των ραδιενεργών προϊόντων. Έτσι, αν η συστάδα μετά την έξοδο από την καρδιά παραμείνει χωρίς ψύξη, υπάρχει κίνδυνος τήξης του περιβλήματος ράβδων καυσίμου και διαρροής των ραδιενεργών προϊόντων. Παραδείγματος χάριν, αμέσως μόλις εξαχθεί εξαντλημένη συστάδα σύγχρονου αντιδραστήρα ελαφρύ ύδατος, ηλεκτρικής ισχύος 1000 MW, είναι τόσο ραδιενεργός, ώστε εκλύει θερμότητα μερικών εκατοντάδων KW.

Δεδομένου ότι η ραδιενέργεια μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, η παραγόμενη από τη συστάδα θερμότητα μετά από ένα έτος μειώνεται σε πέντε περίπου KW και μετά από

πέντε έτη σε ένα KW. Σαράντα έτη μετά την έξοδο από την καρδιά η ραδιενέργεια της συστάδας πέφτει στο ένα χιλιοστό αυτής που υπήρχε κατά την έξοδο από την καρδιά.



Εικόνα 1: Δεξαμενή προσωρινής αποθήκευσης συστάδων χρησιμοποιημένου καυσίμου

Έχουν επικρατήσει οι εξής δύο πολιτικές διαχείρισης:

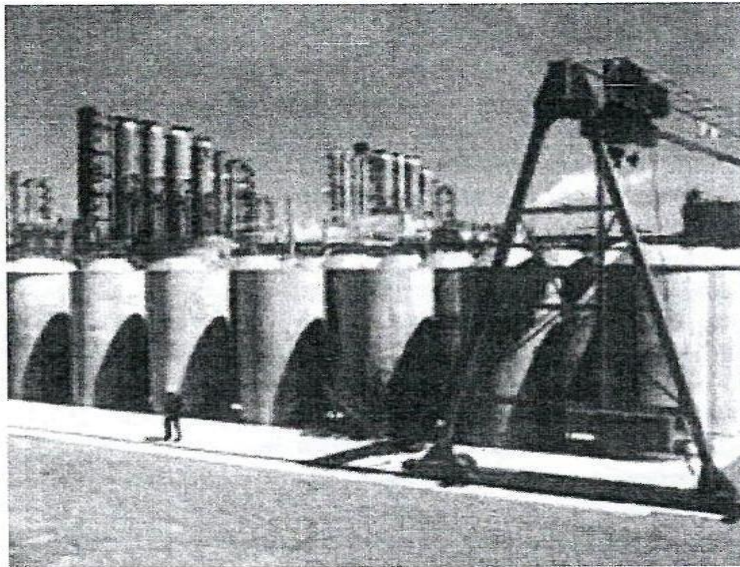
- a. **Ανακύκλωση** του χρησιμοποιημένου καυσίμου για τον διαχωρισμό του ουρανίου και του πλουτωνίου από τα «λοιπά ραδιενεργά υλικά». Στην περίπτωση αυτή αντιμετωπίζονται ως κατάλοιπα αυτά τα «λοιπά ραδιενεργά υλικά» τα οποία περιέχουν τα προϊόντα της σχάσης και τα υπερουράνια στοιχεία. Στόχοι της ανακύκλωσης είναι η απόκτηση των χρήσιμων ουρανίου και πλουτωνίου και ο περιορισμός του όγκου των καταλοίπων. Η πολιτική αυτή ακολουθείται από τις ευρωπαϊκές χώρες, πλην της Σουηδίας, και από την Ιαπωνία.
- b. **Αντιμετώπιση του συνόλου της χρησιμοποιημένης συστάδας καυσίμου ως καταλείπου.** Η πολιτική αυτή ακολουθείται από τη Σουηδία, υιοθετήθηκε από τις ΗΠΑ επί προεδρίας Κάρτερ και πρόσφατα από τον Καναδά. Στις χώρες αυτές αξιολογείται ως οικονομικά μη ενδιαφέρον το «άρμεγμα» ουρανίου και πλουτωνίου από το χρησιμοποιημένο καύσιμο, οπότε το σύνολο της συστάδας του χρησιμοποιημένου καυσίμου, ως έχει, χωρίς οποιαδήποτε επεξεργασία, θεωρείται, και υφίστανται διαχείριση, ως κατάλοιπο. Βεβαίως, στην περίπτωση αυτή ο όγκος των καταλοίπων είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν των καταλοίπων της ανακύκλωσης. Η κατάσταση του χρησιμοποιημένου καυσίμου, στη μορφή του κεραμικού διοξειδίου του ουρανίου, θεωρείται ευσταθής.

Οι συστάδες του χρησιμοποιημένου καυσίμου παραμένουν στην δεξαμενή προσωρινής αποθήκευσης για μερικά έτη, συνήθως πέντε, μέχρις ότου η παραγόμενη θερμότητα και η παραμένουσα ραδιενέργεια μειωθούν σε επίπεδα που επιτρέπουν τον ασφαλή χειρισμό των συστάδων.

Μετά από αυτό, στην περίπτωση πολιτικής ανακύκλωσης, οι συστάδες καυσίμου μεταφέρονται με κατάλληλα θωρακισμένα δοχεία σε **εργοστάσιο ανακύκλωσης** του χρησιμοποιημένου καυσίμου. Εκεί, αφού πρώτα τεμαχισθεί και διαλυθεί το χρησιμοποιημένο καύσιμο σε νιτρικό οξύ, διαχωρίζεται με χημικές μεθόδους το ουράνιο και το πλουτώνιο από τα λοιπά ραδιενεργά προϊόντα. Το πλουτώνιο μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί και χρησιμοποιείται, ως σχάσιμο υλικό στους αντιδραστήρες. Τα εναπομένοντα ραδιενεργά

προϊόντα, κυρίως τα προϊόντα της σχάσης και τα υπερουράνια, θεωρούνται και είναι **κατάλοιπα** προς ασφαλή μακροχρόνια διαχείριση. Εκπέμπουν ακτινοβολίες άλφα, βήτα, γάμμα σε πολύ υψηλά επίπεδα ραδιενέργειας. Αποθηκεύονται προσωρινά σε υγρή μορφή σε κατάλληλες δεξαμενές πολλαπλών τοιχωμάτων από ανοξείδωτο χάλυβα, περιβαλλόμενες από προεντεταμένο σκυρόδεμα, όπου ψύχονται συνεχώς, δεδομένου ότι συνεχίζουν να παράγουν σημαντικές ποσότητες θερμότητας. Μολονότι οι κανονισμοί ασφάλειας των εργοστασίων ανακύκλωσης και των εγκαταστάσεων προσωρινής αποθήκευσης είναι πολύ αυστηροί, έχουν συμβεί διαρροές καταλοίπων στο περιβάλλον από τα εργοστάσια αυτά.

Στις χώρες που επέλεξαν τη πολιτική αντιμετώπισης του συνόλου του χρησιμοποιημένου καυσίμου ως καταλοίπου, οι συστάδες του χρησιμοποιημένου καυσίμου φυλάσσονται, αρχικά στους πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Βρίσκονται είτε στις δεξαμενές νερού του πυρηνικού σταθμού είτε σε ξηρά αποθήκευση. Με την ξηρά αποθήκευση, αφού η συστάδα καυσίμου μείνει επί μερικά έτη στη δεξαμενή νερού του πυρηνικού σταθμού, ώστε η παραγόμενη θερμότητα και η εκπεμπόμενη ραδιενέργεια να πέσουν σε ανεκτά επίπεδα, η συστάδα μεταφέρεται εκτός δεξαμενής και τοποθετείται σε δοχείο από μπετόν κατάλληλου πάχους, το οποίο λειτουργεί ως θωράκιση της ραδιενέργειας. Η ψύξη της συστάδας πραγματοποιείται με φυσική κυκλοφορία αέρα (Εικόνα 2).



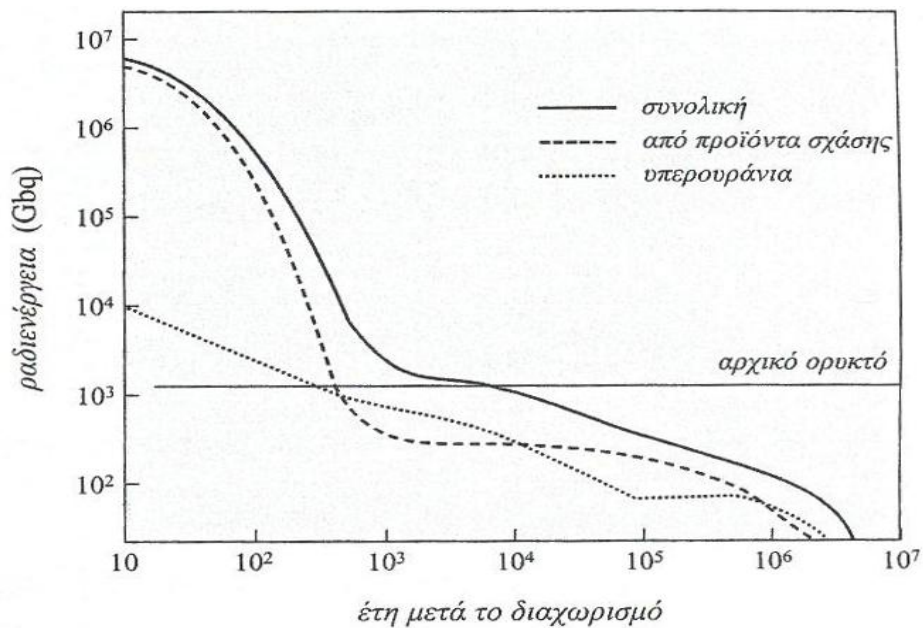
Εικόνα 2: Δοχεία ξηράς αποθήκευσης συστάδων καυσίμου.

Εξάιρεση αποτελεί η Σουηδία, η οποία διαθέτει από το 1988 κεντρική εγκατάσταση αποθήκευσης καταλοίπων. Μετά από παραμονή των συστάδων στην δεξαμενή νερού του πυρηνικού σταθμού επί ένα περίπου έτος, οι συστάδες αποστέλλονται στη κεντρική εγκατάσταση όπου αποθηκεύονται σε δεξαμενή νερού, στην οποία προβλέπεται να παραμείνουν επί 40 έτη.

7.3. ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ

Προκειμένου να γίνει αντιληπτή η κλίμακα της χρονικής διάρκειας που απαιτείται για την ασφαλή διαχείριση ή την ασφαλή εναπόθεση (π.χ. ενταφιασμό) των καταλοίπων,

παρατίθεται το διάγραμμα του Σχήματος 16, το οποίο παρουσιάζει την χρονική μεταβολή της συνολικής ραδιενέργειας των καταλοίπων (εν προκειμένω κυρίως προϊόντων της σχάσης και των υπερουράνιων) ,που προκύπτουν από έναν τόνο καυσίμου αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος (PWR).



Σχήμα 16: Ραδιενέργεια από ένα τόνο εξαντλημένου καυσίμου αντιδραστήρα PWR. Η οριζόντια συνεχής γραμμή δίνει τη συνολική ραδιενέργεια του κοιτάσματος ουρανίου από το οποίο παρήχθη το καύσιμο.

Στο Σχήμα 16 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της ραδιενέργειας των προϊόντων της σχάσης, των υπερουράνιων και της συνολικής ραδιενέργειας των καταλοίπων, δηλαδή του αθροίσματος των δύο προηγούμενων. Η οριζόντια συνεχής γραμμή δίνει, ως μέτρο σύγκρισης, τη συνολική φυσική ραδιενέργεια της ποσότητας κοιτάσματος ουρανίου που είναι απαραίτητη για την κατασκευή ενός τόνου καυσίμου. Ο κατακόρυφος άξονας δίνει το μέγεθος της ραδιενέργειας και ο οριζόντιος τον χρόνο σε έτη.

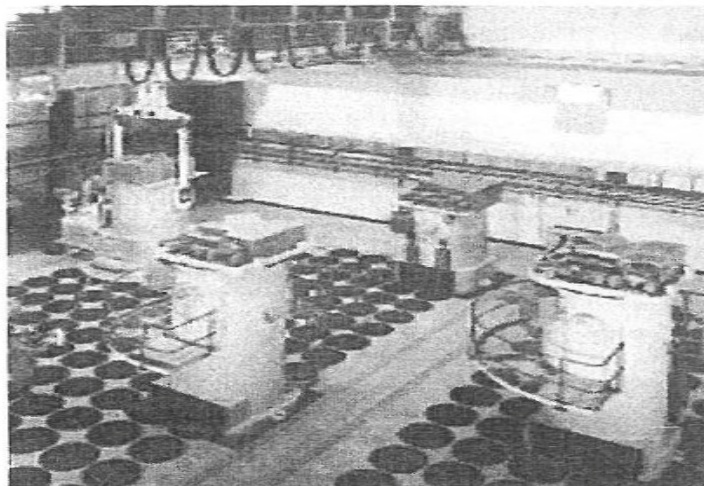
Πρακτικά και για την ποιοτική εξέταση που ακολουθεί, αυτός ο χρόνος μπορεί να αναγνωσθεί ως χρόνος μετά την έξοδο του καυσίμου από τον αντιδραστήρα. Για ό,τι ακολουθεί δεν ενδιαφέρουν οι απόλυτες τιμές της ραδιενέργειας, αλλά η χρονική μεταβολή της. Βλέπουμε ότι από τα 10 έως τα 1000 έτη η συνολική ραδιενέργεια των καταλοίπων μειώνεται κατά χίλιες περίπου φορές. Επίσης, σε λιγότερο από 1000 έτη η ραδιενέργεια των προϊόντων της σχάσης πέφτει κάτω από αυτήν του ορυκτού. Η συνολική ραδιενέργεια όμως προσεγγίζει αυτήν του ορυκτού σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και μέχρι τα δέκα χιλιάδες περίπου έτη παραμένει ίση σχεδόν με αυτήν του ορυκτού. Μολονότι η σύγκριση με το φυσικό ορυκτό δίνει το μέτρο της χρονικής κλίμακας της διακινδύνευσης, η επάνοδος στα επίπεδα ραδιενέργειας του φυσικού ορυκτού δεν είναι επαρκές κριτήριο ακτινοπροστασίας. Το ζητούμενο είναι η διασφάλιση ότι, ακόμη και μετά των πτώση της συνολικής ραδιενέργειας κάτω από τα επίπεδα του φυσικού ορυκτού, τα μακρόβια ραδιενεργά προϊόντα της σχάσης και τα υπερουράνια ισότοπα θα παραμείνουν απομονωμένα και δεν θα εισέλθουν στη βιόσφαιρα και δι' αυτής στην τροφική αλυσίδα και στο εσωτερικό του σώματος του ανθρώπου. Πρέπει λοιπόν να υπάρξει ασφαλής διαχείριση των ραδιενεργών καταλοίπων επί πολλές χιλιετίες.

Οι περισσότερες χώρες που διαθέτουν πυρηνικούς αντιδραστήρες ισχύος έχουν αποφασίσει την τελική εναπόθεση των καταλοίπων σε μεγάλο βαθμό(500 έως 1000 μέτρα) στη γη, σε κατάλληλους γεωλογικούς σχηματισμούς, και την παρεμβολή πολλαπλών φραγμάτων μεταξύ των καταλοίπων και της βιόσφαιρας. Τέτοια φράγματα θεωρούνται:

- § Ο μετασχηματισμός των καταλοίπων σε αδιάλυτη ευσταθή μορφή,
- § Ο εγκλωβισμός σε στεγανά δοχεία ανθεκτικά στη διάβρωση

Η τοποθέτηση των δοχείων σε μεγάλο βάθος στο έδαφος σε ευσταθείς γεωλογικούς σχηματισμούς δια των οποίων δεν διέρχονται υπόγεια ύδατα. Στις χώρες που επέλεξαν πολιτική ανακύκλωσης, τα υγρά κατάλοιπα προκειμένου να εναποτεθούν οριστικά, πρέπει να μετασχηματισθούν σε φυσικά ευσταθή και χημικά αδρανή μορφή. Η μέθοδος που εφαρμόζεται σήμερα σε βιομηχανική κλίμακα είναι η υλοποίηση των καταλοίπων. Αυτό γίνεται με αποξήρανση των καταλοίπων και συμπύκνωση τους σε στεγνή πούδρα, η οποία αναμειγνύεται σε υγρό γυαλί παρομοίου τύπου με το πυρέξ. Το υγρό γυαλί χύνεται σε μεγάλα δοχεία από ανοξείδωτο χάλυβα και εκεί συμπυκνώνονται σε «στερεό» γυαλί. Κάθε δοχείο περιέχει περίπου 400 χιλιόγραμμα τέτοιου γυαλιού. Τα δοχεία αυτά αποθηκεύονται προς το παρόν μεσοπρόθεσμα, δηλαδή για μερικές δεκαετίες, σε κατάλληλους επιβλεπόμενους χώρους.

Εργοστάσια υαλοποίησης λειτουργούν στη Γαλλία (από το 1978), στην Αγγλία, στο Βέλγιο, στη Ρωσία, στην Ινδία και ένα μικρό στην Ιαπωνία, η οποία μέχρι τώρα ανακυκλώνει το μεγαλύτερο μέρος των καταλοίπων της στην Ευρώπη, ενώ κατασκευάζει ένα μεγάλο εργοστάσιο υαλοποίησης. Στις ΗΠΑ έχουν κατασκευασθεί τρία εργοστάσια υαλοποίησης, εκ' των οποίων το ένα σταμάτησε τη λειτουργία του, διότι οι αυξημένες απαιτήσεις ασφάλειας που επιβλήθηκαν το κατέστησαν μη οικονομικό, το δεύτερο απέτυχε να λειτουργήσει επιτυχώς και το τρίτο δεν ολοκληρώθηκε, διότι οι ΗΠΑ επί προεδρίας Κάρτερ εγκατέλειψαν την πολιτική ανακύκλωσης. Η υαλοποίηση των καταλοίπων επελέγη διότι το γυαλί θεωρείται ευσταθές διαλυτό υλικό. Δεν έχει όμως αποδειχθεί πειραματικά ότι το γυαλί αυτό θα παραμείνει ευσταθές για τις χιλιάδες έτη που απαιτούνται. Είναι δύσκολο να αποδειχθεί τέτοια χρονική κλίμακα. Η σχετική έρευνα συνεχίζεται.



Εικόνα 3: Σιλό αποθήκευσης δοχείων υαλοποιημένων καταλοίπων στην Αγγλία. Κάθε μεταλλικός δίσκος στο πάτωμα καλύπτει ένα σιλό που περιέχει δέκα δοχεία τοποθετημένα κατακόρυφα το ένα πάνω στο άλλο. Οι λευκοί κύλινδροι είναι θωρακισμένες μηχανές φόρτωσης των δοχείων στα σιλό.

Ανεξάρτητα αν τα κατάλοιπα είναι από ανακύκλωση και υαλοποιημένα ή ολόκληρες συστάδες καυσίμου, η οριστική τους εναπόθεση προβλέπεται να γίνει βαθιά στο έδαφος. Πριν από αυτό θα παραμείνει επί 40 έως 50 περίπου έτη στην προσωρινή αποθήκη, όπως αυτή περιγράφηκε προηγουμένως, για την μείωση της παραγόμενης θερμότητας και της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, ώστε ο χειρισμός τους να καταστεί ευκολότερος. Μετά προβλέπεται να τοποθετηθούν σε υδατοστεγή δοχεία από ανθεκτικό στη διάβρωση υλικό, π.χ. από ανοξείδωτο χάλυβα. Μετά προβλέπεται να εναποτεθούν σε βάθος 500 έως 1000 μέτρων σε γεωλογικό σχηματισμό, δια του οποίου δεν διέρχονται και δεν προβλέπεται να διέλθουν για πολλές χιλιετίες υπόγεια ύδατα.

Τα δοχεία προβλέπεται επίσης να καλυφθούν με ικανού πάχους υλικό, που δυσχεραίνει τη διέλευση υδάτων, όπως η μπεντονιτική άργιλος. Οι τύποι γεωλογικών σχηματισμών που είναι προς το παρόν υπό αξιολόγηση είναι σκληροί κρυσταλλικοί βράχοι και βράχοι άλατος.

Εάν παρά τις προβλέψεις, διέλθουν υπόγεια ύδατα ικανά να μεταφέρουν «ουσίες» στην επιφάνεια της Γης και στο βιοσύστημα, θα πρέπει να μην διαβρώσουν τα δοχεία και να μην έλθουν σε επαφή με τα κατάλοιπα. Εάν, παρά ταύτα, διαβρώσουν τα σχεδιασμένα ως μη διαβρώσιμα στεγανά δοχεία, δεν θα πρέπει να διαλύσουν τα προβλεπόμενα ως αδιάλυτα κατάλοιπα (γυαλί, κεραμικό διοξείδιο του άνθρακα). Είναι φανερό ότι εφαρμόζεται και εδώ η φιλοσοφία της άμυνας σε βάθος, με την έννοια ότι σχεδιάζονται διαδοχικά φράγματα αποτροπής της ρύπανσης της βιόσφαιρας, καθένα από τα οποία έχει μικρή πιθανότητα να διαρραγεί.

Υπάρχουν όμως κρίσιμα και ενδεχομένως αμφιλεγόμενα ζητήματα τα οποία συνεπάγονται προβληματισμούς ηθικής τάξεως. Δεδομένου του τόσο μεγάλου χρονικού διαστήματος που απαιτείται για την ασφαλή διαχείριση των καταλοίπων, η οποία συνεπάγεται την εμπλοκή πολλών επερχόμενων γενεών, ποιόν βαθμό τεχνικής βεβαιότητας πρέπει να απαιτήσουμε ώστε:

- Οι γεωλογικοί σχηματισμοί να παραμείνουν ευσταθείς και να μην διέλθουν δι' αυτών υπόγεια ύδατα
- Και αν διέλθουν, να μην διαβρωθούν τα δοχεία
- Και αν διαβρωθούν τα δοχεία, τα κατάλοιπα να παραμένουν ευσταθή, μη διαλυτά.

Τα ερωτήματα αυτά όχι μόνο θεμιτά, αλλά επιβάλλεται να τίθενται από ενημερωμένες κοινωνίες και να δίνονται σε αυτά πειστικές απαντήσεις από τους επιστήμονες, ώστε οι πολίτες δια των εκπροσώπων τους να είναι σε θέση να λάβουν νηφάλια απόφαση για το τόσο σοβαρό ζήτημα που αφορά στο ενεργειακό πρόβλημα, άρα στην ποιότητα ζωής και στην υγεία. Ο γράφων εκτιμά ότι ασφαλείς τεχνικές λύσεις υπάρχουν.

Μέχρι σήμερα λειτουργεί μία μόνο εγκατάσταση εναπόθεσης ραδιενεργών καταλοίπων βαθιά στη Γη στις ΗΠΑ, για ραδιενεργά κατάλοιπα των ενόπλων δυνάμεων. Αναφέρεται ότι η Σουηδία προγραμματίζει εγκατάσταση οριστικής εναπόθεσης στο έδαφος μεταξύ των ετών 2015 και 2020.

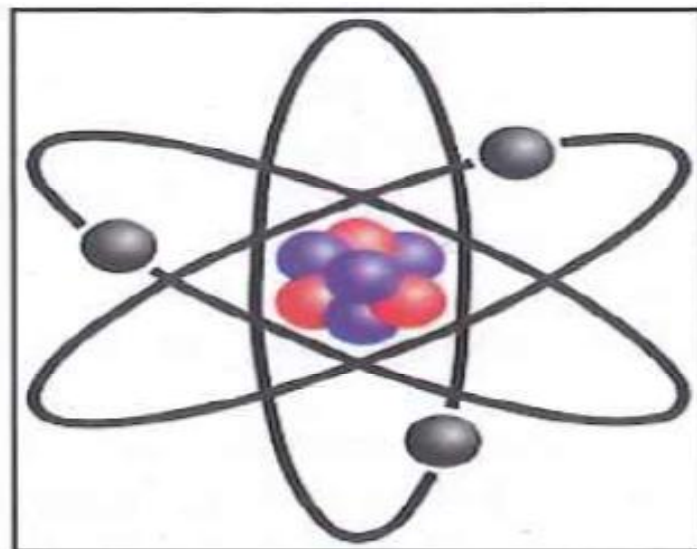
Το κεφάλαιο αυτό θα κλείσει με την επισήμανση ότι περιβαλλοντική ρύπανση από ραδιενεργά κατάλοιπα έχει συμβεί (διαρροές από δοχεία αποθήκευσης, ρύπανση γης), από τα πυρηνικά πολεμικά προγράμματα σε χώρες όπως οι ΗΠΑ και η πρώην Σοβιετική Ένωση.

8. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΤΟΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

8.1. ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΎΛΗΣ

Το άτομο θεωρούνταν, από την εποχή του Δημόκριτου και έως τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, το απλούστερο δομικό στοιχείο της ύλης. Ο Rutherford, βασιζόμενος στα σχετικά με τη σκέδαση των εκπεμπόμενων από ραδιενεργά στοιχεία ακτινών άλφα(πυρήνες ηλίου) από λεπτά μεταλλικά φύλλα πειράματα των Geiger-Marsden, έδωσε την κλασική εικόνα του ατόμου κατά την οποία γύρω από θετικά φορτισμένο πυρήνα, ο οποίος αποτελείται στη γενική περίπτωση από πρωτόνια (p) και νετρόνια (n) όπως πρότεινε πρώτος ο Heisenberg, περιστρέφονται τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια (e) εν είδη νέφους ηλεκτρονίων (Εικόνα 4). Πρωτόνιο ονόμασε ο Rutherford (1920) τον πυρήνα του υδρογόνου (είναι ο μόνος σταθερός πυρήνας που δεν περιέχει νετρόνια) και προέβλεψε την ύπαρξη του νετρονίου (1920) δίνοντας του και το όνομα αυτό. Η ύπαρξη του νετρονίου επιβεβαιώθηκε πειραματικά το 1932 από τον Chadwick. Τα πρωτόνια και τα νετρόνια, λόγω του ότι απαντώνται στον πυρήνα (nucleus), μοιράζονται την κοινή ονομασία νουκλεόνια.

Στη βασική του κατάσταση το άτομο, το μικρότερο κομμάτι ύλης που διατηρεί τις χημικές ιδιότητες του στοιχείου από το οποίο προέρχεται, είναι ηλεκτρικά ουδέτερο αφού ο αριθμός των πρωτονίων του είναι ίσος με τον αριθμό των ηλεκτρονίων. Από τις γνωστές διαστάσεις του πυρήνα (10^{-14}m) και του ατόμου (10^{-10}m) προκύπτει ότι το άτομο είναι κυρίως κενός χώρος, με τον πυρήνα να καταλαμβάνει το 10^{-12} του όγκου του ατόμου. Η πυκνότητα του πυρήνα είναι της τάξης των 10^{14}g/cm^3 .



Εικόνα 4: Η κλασική εικόνα του ατόμου κατά Rutherford

8.2. ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΕΙΚΟΝΑ

Την εικόνα του ατόμου κατά Rutherford και τη σταθερότητα του καθότι τα ηλεκτρόνια, παρόλο που περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα, δεν χάνουν ενέργεια και δεν πέφτουν πάνω του όπως θα προέβλεπαν οι νόμοι της κλασικής φυσικής, τη στήριξε ο Bohr διατυπώνοντας τις επονομαζόμενες «συνθήκες του Bohr» για τα υδρογονοειδή άτομα. Κατά την 1^η συνθήκη του Bohr, η κίνηση του ηλεκτρονίου επιτρέπεται μόνο σε τροχιές για τις οποίες η στροφορμή του είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της ποσότητας $h/2\pi$ (κβάντωση της στροφορμής), όπου h είναι η σταθερά του Planck. Για $n=1$, το ηλεκτρόνιο κινείται στην πλησιέστερη στον πυρήνα τροχιά και το άτομο βρίσκεται στη βασική κατάσταση. Κατά τη 2^η συνθήκη του Bohr, όταν το ηλεκτρόνιο κινείται σε μια επιτρεπόμενη τροχιά δεν εκπέμπει ακτινοβολία παρόλο που, ως αποτέλεσμα της περιστροφής του, επιταχύνεται συνεχώς. Με την πρόσληψη κατάλληλου ποσού ενέργειας (συντονισμός) το ηλεκτρόνιο μπορεί να μεταπηδήσει από μια επιτρεπτή τροχιά ελάχιστης ενέργειας σε άλλη επιτρεπτή τροχιά μεγαλύτερης ενέργειας (διέγερση) από την οποία όμως θα επιστρέψει στην αρχική τροχιά μετά από ελάχιστο χρόνο (της τάξης των 10^{-9} s) εκπέμποντας ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ενέργειας ίσης με τη διαφορά ενέργειας των δυο τροχιών.

Ο Sommerfeld, επέκτεινε τη θεωρία του Bohr ώστε να περιλαμβάνει πιο σύνθετα άτομα αποδεικνύοντας ότι τα ηλεκτρόνια διαγράφουν εκτός των κυκλικών και ελλειπτικές τροχιές γύρω από τον πυρήνα και εισάγοντας εκτός από τον κύριο (n) και το δευτερεύοντα κβαντικό αριθμό (l). Επειδή, η ταχύτητα του ηλεκτρονίου, ακόμη και στη βασική κατάσταση, είναι της τάξης του 1% της ταχύτητας του φωτός (σταθερά λεπτής υφής), η όλη περιγραφή απαιτεί ρελατιβιστικές διορθώσεις, όπως προβλέπει η θεωρία της ειδικής σχετικότητας του Einstein. Το ηλεκτρόνιο εκτελεί και δική του περιστροφική κίνηση περί άξονα που διέρχεται από το κέντρο του και άρα έχει «ίδια» στροφορμή, το σπιν. Επίσης, όπως πρώτος ανακάλυψε ο de Broglie, τα κινούμενα σωμάτια και ιδιαίτερα τα ηλεκτρόνια, εμφανίζουν και κυματική υφή (κυματοσωματιδιακός δυισμός).

Σαν αποτέλεσμα αυτής της ιδιότητας, ο Heisenberg διατύπωσε την φερώνυμη «αρχή της απροσδιοριστίας» σύμφωνα με την οποία δεν μπορούμε να προσδιορίσουμε με ακρίβεια τις τιμές συζυγών μεταβλητών όπως η θέση και η ορμή του σωματιδίου ή η ενέργεια και ο χρόνος. Επιστέγασμα όλων των παραπάνω είναι η διατύπωση από το θεμελιωτή της κβαντομηχανικής Schrodinger της ομώνυμης κυματικής εξίσωσης των σωματιδίων που περιγράφει την κατάσταση του σωματιδίου με κβαντομηχανικούς όρους. Η ίδια η κβαντομηχανική αναπτύχθηκε και ωρίμασε με την πάροδο των ετών υιοθετώντας διάφορες μαθηματικές αναπαραστάσεις (φορμαλισμός).

8.3. ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΑΝΤΙΑΛΗΨΕΙΣ

Η κατασκευή μεγάλων επιταχυντών σωματιδίων και η επακόλουθη ανακάλυψη πληθώρας διαφορετικών σωματιδίων επέκτεινε τις γνώσεις μας και άλλαξε την εικόνα που έχουμε για τη δομή της ύλης. Σύμφωνα με το επικρατέστερο σύγχρονο μοντέλο που περιγράφει τον υποατομικό κόσμο (καθιερωμένο μοντέλο - standard model), υπάρχουν δυο βασικές ομάδες στοιχειωδών σωματιδίων, τα κουάρκς (quarks) και τα λεπτόνια (leptons) και, μια ομάδα δυνάμεων, στην πραγματικότητα πεδίων (fields), που τους επιτρέπουν να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Οι δυνάμεις αυτές μπορεί να θεωρηθούν ότι ενεργούν μέσω ανταλλαγής σωματιδίων που ονομάζονται μποζόνια βαθμίδας (gauge bosons). Κλασικό παράδειγμα αποτελεί το σωματίδιο ανταλλαγής της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης και

μποζόνιο βαθμίδας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, το φωτόνιο ή κβάντο (quantum) του φωτός (Πινάκας 16).

Κουάρκ	u	(Up-Πάνω)
	d	(Down-Κάτω)
	c	(Charm-ητευτικό)
Γο -	s	(Strange-Παράξενο)
	T	(Top-φη)
Κορυ- Λεπτόνια	b	(Bottom-Πυθμένας)
	e	(Electron-ηλεκτρόνιο)
	M	(Muon-μιόνιο)
Νετρώνια	T	(Tau-ταυ)
	ν _e	(Νετρίνο ηλεκτρονίου)
	ν _μ	(Νετρίνο μιονίου)
Πεδία	ν _τ	(Νετρίνο ταυ)
	Ισχυρή	
	Ηλεκτρομαγνητική	
Μποζόνια βαθμίδας	Ασθενής	
	Βαρυτική	
	Γκλουόνιο	
	γ(φωτόνιο)	
	W και Z	
	Γκραβιτόνιο (δεν επιβεβαιώθηκε η ύπαρξη του)	

Πίνακας 16: Σωματίδιο ανταλλαγής της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης και μποζόνιο βαθμίδας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, το φωτόνιο ή κβάντο (quantum) του φωτός

Τα στοιχειώδη σωματίδια συνδυάζονται και σχηματίζουν την πληθώρα των σωματιδίων (particles) που ανιχνεύονται στα πειράματα με τους επιταχυντές σωματιδίων. Όλα τα σωματίδια έχουν και τα αντίστοιχα αντισωματίδια τους (antiparticles), σχηματίζοντας ζεύγη που είναι γνωστά ως ύλη και αντιύλη. Το ποζιτρόνιο (positron), που τόσο εντυπωσιακά χρησιμοποιείται στην Τομογραφία Ποζιτρονικής Εκπομπής (PET) της σύγχρονης Πυρηνικής Ιατρικής, δεν είναι τίποτε άλλο παρά το αντισωματίδιο του γνωστού μας ηλεκτρονίου. Η ύπαρξη του ποζιτρονίου προβλέφθηκε από την εξίσωση Dirac και επιβεβαιώθηκε πειραματικά το 1936 από τον Anderson

Ακόμη και τα κουάρκ έχουν τα αντισωματίδια τους, τα αντικουάρκ. Τα κουάρκ συνδυάζονται και σχηματίζουν βαρύτερα σωματίδια που ονομάζονται βαρυόνια (baryons), ενώ από το συνδυασμό κουάρκ και αντικουάρκ σχηματίζονται τα μεσόνια (mesons).

Τα πρωτόνια και τα νετρώνια αποτελούν παραδείγματα βαρυονίων. Τα Κ-μεσόνια (Καόνια-kaons) και τα π-μεσόνια (π^+ , π^- , π^0 - mesons) αποτελούν παραδείγματα μεσονίων. Πολλά από τα εξωτικά αυτά σωματίδια δεν αποτελούν απλώς τυχαίες ανακαλύψεις αλλά έχουν μεγάλη φυσική σημασία. Για παράδειγμα, δεχόμαστε πλέον ως γεγονός ότι μέσα στον πυρήνα γίνονται μετατροπές κατά τις οποίες ένα νουκλεόνιο δίσταται σε ένα ζεύγος συζυγούς νουκλεονίου και πιονιού, π.χ. κατά το σχήμα $p \rightarrow n + \pi^+$.

Συναφές θέμα αποτελούν τα σωματίδια ανταλλαγής. Η έννοια των «δυνάμεων ανταλλαγής» προτάθηκε για πρώτη φορά το 1932 από τον Heisenberg. Ο Yukawa πρώτος εισηγήθηκε την έννοια της ύπαρξης κάποιου βαρέος σωματιδίου που δρα ως σωματίδιο ανταλλαγής μεταξύ των νουκλεονίων μέσα στον πυρήνα. Στα τέσσερα βασικά κβαντικά πεδία

της φύσης αντιστοιχούνται σωματίδια ανταλλαγής. Με τις σύγχρονες αντιλήψεις, η έννοια των σωματιδίων ανταλλαγής απαντάται στη «θεωρία κβαντικού πεδίου».

Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ σωματιδίων παριστάνονται από τα «διαγράμματα Feynman»τα οποία εισήγαγε ο βραβευμένος με βραβείο Nobel Richard Feynman το 1948. Στα διαγράμματα Feynman, στην αριστερή πλευρά εμφανίζονται τα αλληλοεπιδρώντα σωματίδια, το «βέλος του χρόνου» έχει πάντα κατεύθυνση από τα αριστερά προς τα δεξιά και στη δεξιά πλευρά εμφανίζονται τα «προϊόντα» της αλληλεπίδρασης.

8.4. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Ο ατομικός αριθμός (Z) εκφράζει το πλήθος των πρωτονίων του πυρήνα ενός στοιχείου. Είναι επίσης ίσος με τον αριθμό των περιφερόμενων ηλεκτρονίων του. Ο μαζικός αριθμός (A) δίνει το σύνολο των πρωτονίων και νετρονίων. Ένα τυχαίο στοιχείο X παριστάνεται ως A_{ZX} αλλά μπορεί μονοσήμαντα να γραφεί και ως A_X καθότι το σύμβολο X αντιστοιχεί σε ένα και μοναδικό ατομικό αριθμό Z , π.χ. 131_I . Ο αριθμός $N=A-Z$ εκφράζει τον αριθμό των νετρονίων του πυρήνα.

Αν νουκλίδιο καλείται ο πυρήνας ο οποίος αποτελείται από συγκεκριμένο αριθμό p και n , ως ισότοπα καλούμε τα νουκλίδια τα οποία έχουν ίδιο Z αλλά διαφορετικό A , π.χ. $123_I, 124_I, 131_I$. Εντελώς αντίστοιχα, ισοβαρή είναι τα νουκλίδια με ίδιο A αλλά διαφορετικό Z και ισότονα είναι τα νουκλίδια με ίδιο αριθμό νετρονίων. Στην εξαιρετικά χρήσιμη περίπτωση του τεχνητίου ($Tc-99$), στοιχείου που χρησιμοποιείται κατά κόρον στην Πυρηνική Ιατρική, μετασταθερά (metastable) ονομάζεται μια διεγερμένη και ασταθής κατάσταση του πυρήνα ενός στοιχείου, π.χ. του $Tc-99m$. Μετά την πάροδο χαρακτηριστικού χρόνου, ο διεγερμένος πυρήνας αυθόρμητα μεταπίπτει από τη διεγερμένη κατάσταση του σε σταθερότερη κατάσταση εκπέμποντας ακτινοβολία.

Η σταθερότητα των πυρήνων ως συναρτήση των Z και N . Τα στοιχεία που απαντώνται στη γη σχηματίστηκαν πριν από περίπου 5×10^9 χρόνια. Πάνω στη γη έχουν απομείνει τα σταθερά νουκλίδια και από τα ραδιενεργά, εκείνα των οποίων ο χρόνος υποδιπλασιασμού (ο χρόνος που απαιτείται για τη μείωση του αριθμού των ραδιενεργών πυρήνων στο μισό) είναι μεγαλύτερος από 10^9 χρόνια. Μέχρι την ώρα που γράφεται το παρόν έχουν ανακαλυφθεί 118 στοιχεία, εκ των οποίων τα πρώτα 98 απαντώνται φυσικά στη γη. Τα 80 εξ' αυτών είναι σταθερά στοιχεία ενώ τα υπόλοιπα είναι ραδιενεργά.

Αν οι σταθεροί πυρήνες καταταγούν ως προς τους αριθμούς Z , N και A προκύπτει ότι τα σταθερά στοιχεία στη φύση έχουν τάση προς άρτιο Z και N . Οι πυρήνες με Z και N άρτιο-περιττό ή αντίστροφα, είναι σχετικά λίγοι και οι πυρήνες με περιττό Z και N πραγματικά ελάχιστοι. Δεδομένου του ότι και τα νουκλεόνια έχουν ιδιοστροφορμή (σπιν), έχει αποδειχθεί ότι στη βασική σταθερή κατάσταση υπάρχει τάση δυο νουκλεόνια του ίδιου τύπου και της ίδιας κατάστασης, αλλά αντιθέτου σπιν, να σχηματίζουν ζεύγη. Η μελέτη των σταθερών νουκλιδίων δείχνει ότι στους αντίστοιχους πυρήνες ο αριθμός των νετρονίων είναι μεγαλύτερος ή το πολύ ίσος με τον αριθμό των πρωτονίων. Στα ραδιενεργά νουκλίδια ο αριθμός των νετρονίων είναι γενικά μεγαλύτερος από τον αριθμό των πρωτονίων.

Παρατηρούμε ότι για τα ελαφρά ισότοπα ισχύει $Z=N$. Όσο τα στοιχεία γίνονται βαρύτερα, τόσο απομακρύνονται από τη γραμμή της αριθμητικής ισότητας πρωτονίων-νετρονίων. Ο γεωμετρικός τόπος των σταθερών ισotόπων ονομάζεται «κοιλιάδα σταθερότητας». Αριστερά της κοιλιάδας σταθερότητας βρίσκονται τα β^+ ραδιενεργά και δεξιά τα β^- ραδιενεργά.

8.5. ΕΛΛΕΙΜΜΑ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

Δεδομένου του ότι ο πυρήνας αποτελείται μόνο από πρωτόνια και νετρόνια, θα ήταν αναμενόμενο η μάζα του να ισούται με το άθροισμα των μαζών των p και n τα οποία τον αποτελούν, αν αυτά βρισκόταν σε ελεύθερη κατάσταση. Ομοίως, η μάζα του ατόμου ενός στοιχείου θα έπρεπε να ισούται με το άθροισμα των μαζών των σωματιδίων που το αποτελούν. Τα πειραματικά όμως δεδομένα δίνουν τη μάζα του ατόμου μικρότερη από το παραπάνω άθροισμα. Αυτή η διαφορά μάζας (EM) είναι αυτή που μετατρέπεται και εκλύεται ως ενέργεια κατά το σχηματισμό του ατόμου. Η ενέργεια σύνδεσης (ΕΣ) υπολογίζεται από την αρχή της ισοδυναμίας μάζας-ενέργειας που απορρέει από την ειδική θεωρία της σχετικότητας του Einstein. Αν EM είναι το έλλειμμα μάζας όταν ένας αριθμός p , και e συνδυαστεί κατάλληλα για να σχηματιστεί το άτομο ενός στοιχείου, η ενέργεια σύνδεσης θα είναι $E_S = EM c^2$. Η ενέργεια σύνδεσης ισούται με το ποσό της ενέργειας που απαιτείται να δαπανηθεί για να διασπαστεί το συγκεκριμένο άτομο στα σωματίδια από τα οποία αποτελείται. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μέση ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο η οποία είναι το πηλίκο της συνολικής ενέργειας σύνδεσης του πυρήνα δια του μαζικού αριθμού A . Αντιπροσωπευτική τιμή για τη μέση ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο είναι τα περίπου 8MeV

8.6. ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΦΟΡΤΙΣΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Τα φορτισμένα σωματίδια (πρωτόνια, ηλεκτρόνια, σωματία α , κ.α.) αλληλεπιδρούν με την ύλη και χάνουν την κινητική τους ενέργεια μέσω διεγέρσεων, ιονισμών και απωλειών λόγω ακτινοβολίας. Σκέδαση, είναι η αλληλεπίδραση που έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή πορείας του σωματιδίου. Η σκέδαση κατά την οποία δε μεταβάλλεται η κινητική ενέργεια των σωματιδίων λέγεται «ελαστική». Στην αντίθετη περίπτωση, όπου υπάρχει απώλεια ενέργειας, η σκέδαση λέγεται «μη ελαστική»

8.7. ΔΙΕΓΕΡΣΗ-ΑΠΟΔΙΕΓΕΡΣΗ

Τα φαινόμενα αυτά συμβαίνουν όταν φορτισμένα σωματίδια αλληλεπιδρούν με τροχιακά ηλεκτρόνια εξωτερικών στοιβάδων. Τη διέγερση προκαλεί η μεταφορά μέρους της ενέργειας του εισερχόμενου φορτισμένου σωματιδίου σε ηλεκτρόνιο του ατόμου με αποτέλεσμα τη μετακίνηση του ηλεκτρονίου σε τροχιά μεγαλύτερης ενέργειας, δηλαδή, πιο απομακρυσμένης από τον πυρήνα. Μετά από ελάχιστο χρόνο, της τάξης του 10^{-8} s, το ηλεκτρόνιο επιστρέφει στην αρχική του στοιβάδα και το άτομο εκπέμπει χαρακτηριστική ακτινοβολία, η συχνότητα της οποίας είναι ανάλογη της ενεργειακής διαφοράς των δυο ενεργειακών σταθμών

$$h\nu = E_{\text{τελ}} - E_{\text{αρχ}} \quad [8.1]$$

Όπου:

$E_{\text{αρχ}}$ = η αρχική ενέργεια

$E_{\text{τελ}}$ = η τελική ενέργεια

8.8. ΙΟΝΤΙΣΜΟΣ

Αν κατά το φαινόμενο της διέγερσης η ενέργεια του εισερχόμενου σωματιδίου υπερβαίνει την ενέργεια σύνδεσης του ηλεκτρονίου, εμφανίζεται το φαινόμενο του ιοντισμού. Το ηλεκτρόνιο εγκαταλείπει το άτομο αφήνοντας μια «οπή» ενώ το άτομο παρουσιάζεται ως θετικά φορτισμένο με αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός ζεύγους ιόντων. Αν το ηλεκτρόνιο που εγκατέλειψε το άτομο έχει ικανή ενέργεια μπορεί να προκαλέσει δευτερεύοντες ιοντισμούς.

8.9. ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ «ΕΚ ΠΕΔΗΣΕΩΣ»

Ηλεκτρόνια που πλησιάζουν ένα άτομο μπορούν να σκεδαστούν μη-ελαστικά λόγω της αλληλεπίδρασης τους με το πεδίο του πυρήνα του ατόμου. Η τροχιά του ηλεκτρονίου καμπυλώνεται λόγω της έλξης του θετικά φορτισμένου πυρήνα (δύναμη Coulomb) με ελάττωση της κινητικής ενέργειας του ηλεκτρονίου. Λόγω της αντίστοιχης αρχής διατήρησης, η διαφορά της ενέργειας εκπέμπεται άμεσα ως ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και πιο συγκεκριμένα ως ακτίνες X. Η διαδικασία αυτή, της επιβράδυνσης του ηλεκτρονίου και της συνακόλουθης εκπομπής ακτινοβολίας, ονομάζεται ακτινοβολία «εκ πεδήσεως», από την ελληνική απόδοση του γερμανικού όρου «bremsstrahlung».

8.10. ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΑΦΟΡΤΙΣΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Τα νετρόνια, ως αντιπροσωπευτικά δείγματα αφόρτιστων σωματιδίων, αλληλεπιδρούν με τους πυρήνες ελαφρών στοιχείων, όπως του υδρογόνου, του άνθρακα και του οξυγόνου, μέσω συγκρούσεων τύπου «μπάλας μπιλιάρδου». Οι πυρήνες που προέρχονται από την αντίδραση χάνουν την ενέργεια τους μέσω διεγέρσεων και ιοντισμών. Κατά την αλληλεπίδραση των νετρονίων με τους ιστούς, τα νετρόνια αλληλεπιδρούν κυρίως με το υδρογόνο του νερού, παράγοντας από ανάδραση πρωτόνια (πυρήνες υδρογόνου).

8.11. ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΎΛΗ

Κατά τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσα στην ύλη, τα φωτόνια διαπερνούν το μέσο διάδοσης, σκεδάζονται ή απορροφώνται. Οι τέσσερις βασικές μορφές αλληλεπίδρασης περιγράφονται παρακάτω.

8.12. ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΚΕΔΑΣΗ Η ΣΚΕΔΑΣΗ RAYLEIGH

Κατά την ελαστική σκέδαση, το προσπίπτον φωτόνιο επανεκπέμπεται έχοντας υποστεί μικρή μόνο μεταβολή στη διεύθυνση διάδοσης του χωρίς απώλεια ενέργειας. Στις διαγνωστικές ενέργειες, η αλληλεπίδραση αυτή έχει μικρή πιθανότητα να συμβεί.

8.13. ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΚΕΔΑΣΗ Η ΣΚΕΔΑΣΗ COMPTON Η ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ COMPTON

Το φαινόμενο Compton, έχει σαν επακόλουθο τον ιοντισμό του ατόμου και είναι η πιο συνηθισμένη αλληλεπίδραση των ακτινών X και γ με τους μαλακούς ιστούς στις διαγνωστικές ενέργειες. Συμβαίνει μεταξύ φωτονίων και ηλεκτρονίων των εξώτερων στοιβάδων (στοιβάδων σθένους) των ατόμων. Τα ηλεκτρόνια των εξώτερων στοιβάδων λέμε ότι είναι χαλαρά συνδεδεμένα καθότι έχουν αμελητέα ενέργεια σύνδεσης. Κατά την αλληλεπίδραση του εισερχόμενου φωτονίου με το δέσμιο ηλεκτρόνιο του ατόμου, το ηλεκτρόνιο εγκαταλείπει το άτομο και το φωτόνιο σκεδάζεται με παράλληλη μείωση της ενέργειάς του. Η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου ισούται με το άθροισμα της ενέργειας του σκεδαζόμενου φωτονίου και της κινητικής ενέργειας του εκτινασόμενου ηλεκτρονίου. Η ενέργεια σύνδεσης του ατομικού ηλεκτρονίου είναι αμελητέα σε σύγκριση με την ενέργεια του εισερχόμενου ή ακόμη και του σκεδαζόμενου φωτονίου. Το ποσοστό της ενέργειας του σκεδαζόμενου φωτονίου είναι μεγάλο για εισερχόμενα φωτόνια χαμηλής ενέργειας και μικρές γωνίες σκέδασης.

8.14. ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ Η ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Κατά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (για την ερμηνεία του οποίου στον Einstein απονεμήθηκε το βραβείο Nobel φυσικής το 1921 και όχι για τη θεμελίωση της θεωρίας της σχετικότητας!) ένα φωτόνιο μπορεί να αλληλεπιδράσει με ένα ηλεκτρόνιο εσωτερικής στοιβάδας (K ή L) ενός ατόμου μεταφέροντας όλη την ενέργεια του στο ηλεκτρόνιο αυτό, το οποίο ακολούθως εκτινάσσεται από το άτομο. Το εισερχόμενο φωτόνιο απορροφάται πλήρως, τη δε «οπή» που δημιουργείται στην εσωτερική στοιβάδα που βρισκόταν το ηλεκτρόνιο «γεμίζει» ηλεκτρόνιο πιο απομακρυσμένης στοιβάδας με ταυτόχρονη εκπομπή χαρακτηριστικών ακτινών X ή/και ηλεκτρονίων Auger.

Η κινητική ενέργεια του εκτινασόμενου ηλεκτρονίου ισούται με τη διαφορά της ενέργειας του εισερχόμενου φωτονίου μείον την ενέργεια σύνδεσης του τροχιακού ηλεκτρονίου. Στην περίπτωση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου δεν έχουμε την εκπομπή δευτερεύουσας ακτινοβολίας. Η πιθανότητα να συμβεί φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι αντιστρόφως ανάλογη της τρίτης δύναμης της ενέργειας του προσπίπτοντος φωτονίου.

8.15. ΔΙΔΥΜΗ ΓΕΝΕΣΗ

Δίδυμη γένεση μπορεί να συμβεί όταν ένα φωτόνιο πολύ υψηλής ενέργειας βρεθεί στη «γειτονιά» του πυρήνα ενός ατόμου. Κατά το φαινόμενο αυτό, η ενέργεια του φωτονίου μετατρέπεται σε ένα ζεύγος σωματιδίων βήτα αντίθετου πρόσημου (ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου). Δεδομένου του ότι το ενεργειακό ισοδύναμο της μάζας ηρεμίας κάθε σωματίου βήτα είναι 0.511 MeV, το ενεργειακό κατώφλι της αντίδρασης αυτής είναι 1.02 MeV. Η πέραν του ορίου αυτού ενέργεια του φωτονίου διαμοιράζεται στα σωματία βήτα ως κινητική ενέργεια.

Όπως ακριβώς περιγράφεται παρακάτω, στην περιγραφή του φαινομένου της εξαύλωσης ποζιτρονίου ως επακόλουθο της βήτα-συν διάσπασης ενός ραδιονουκλιδίου (ρν),

το ποζιτρόνιο του ζεύγους χάνοντας σιγά-σιγά την κινητική του ενέργεια έρχεται σε κατάσταση ηρεμίας και η αλληλεπίδραση του με ένα ηλεκτρόνιο καταλήγει στην εξαύλωση του ζεύγους και την πλήρη μετατροπή της μάζας ηρεμίας των σωματιδίων σε ενέργεια με τη μορφή δυο φωτονίων, ενέργειας 0.511 MeV το καθένα. Σε συμφωνία με το νόμο διατήρησης της ορμής, τα φωτόνια αυτά εκπέμπονται σε διαμετρικά αντίθετη κατεύθυνση.

8.16. ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Με τον όρο εξασθένηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας περιγράφεται η μείωση του αριθμού των φωτονίων της αρχικής δέσμης. Η πιθανότητα της εξασθένησης μιας δέσμης φωτονίων μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση του πάχους του μέσου που προκαλεί την εξασθένηση, ονομάζεται γραμμικός συντελεστής εξασθένησης (Linearattenuation coefficient- μ) και συχνότερα εκφράζεται σε μονάδες αντίστροφου πάχους ή απόστασης (cm^{-1}).

Η σχέση μεταξύ της εισερχόμενης σε ένα μέσο δέσμης φωτονίων έντασης I_0 και της εξερχόμενης δέσμης έντασης I , σε σχέση με το πάχος x του μέσου, δίνεται από τον τύπο της εκθετικής μείωσης:

$$I=I_0e^{-\mu x} \quad [8.2]$$

Ως επακόλουθο της παραπάνω σχέσης, το πάχος ημιεξασθένησης (Half Value Layer - HVL) μιας δέσμης ακτινών X ή γ ορίζεται ως το πάχος του υλικού ή μέσου που απαιτείται για να μειώσει την ένταση της δέσμης στο μισό της αρχικής της τιμής. Εύκολα προκύπτει ότι η σχέση μεταξύ του πάχους ημιεξασθένησης και του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης δίνεται από τον τύπο:

$$HVL=0.693/\mu \quad [8.3]$$

8.17. ΜΕΓΕΘΗ ΣΤΗ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΟ ΔΙΑΣΠΑΣΗ

Ενεργότητα (A) ονομάζεται η ποσότητα ενός ραδιενεργού υλικού εκφρασμένη σε διασπάσεις ανά μονάδα χρόνου. Εκφράζεται από τον ακόλουθο τύπο, με το πρόσημο μείον να αποδίδει την ελάττωση των αδιάσπαστων πυρήνων με την πάροδο του χρόνου:

$$A=-dN/dt \quad [8.4]$$

Μονάδα της ενεργότητας στο διεθνές σύστημα μονάδων SI είναι το Μπεκερέλ, για το οποίο ισχύει $1Bq=1$ διάσπαση ανά δευτερόλεπτο (dps). Πιο πρακτική μονάδα μέτρησης, λόγω των υποπολλαπλασίων της που χρησιμοποιούνταν επί χρόνια στην καθημερινή κλινική πράξη, και που δυστυχώς οδεύει προς προαποφασισμένη αντικατάσταση από το Μπεκερέλ, είναι το Κιουρί, για το οποίο ισχύει:

$$1Ci=3.7 \times 10^{10} dps \quad [8.5]$$

Και

$$1mCi=37MBq \quad [8.6]$$

Σταθερά διασπάσεως, αν η σχέση [8.5] γραφεί ως:

$$A = -dN/dt = \lambda N \quad [8.7]$$

Η σταθερά λ ονομάζεται σταθερά διασπάσεως, αποδίδει το ποσοστό των ραδιενεργών πυρήνων που διασπώνται στη μονάδα του χρόνου και είναι χαρακτηριστική για κάθε ρν.

8.18. ΧΡΟΝΟΣ ΥΠΟΔΙΠΛΑΣΙΑΣΜΟΥ Η ΧΡΟΝΟΣ ΗΜΙΣΕΙΑΣ ΖΩΗΣ

Ως χρόνος υποδιπλασιασμού ($T_{1/2}$) ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται να παρέλθει ώστε ο αριθμός των ραδιενεργών πυρήνων σε ένα δείγμα να μειωθεί στο μισό. Η σταθερά διασπάσεως και ο χρόνος υποδιπλασιασμού συνδέονται με τη σχέση:

$$\lambda = \ln 2 / T_{1/2} = 0.693 / T_{1/2} \quad [8.8]$$

Η βασική εξίσωση που περιγράφει τη ραδιενεργό διάσπαση, όσον αφορά στον αριθμό των πυρήνων είναι:

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} \quad [8.9]$$

και έχει την ίδια μορφή όσον αφορά στην ενεργότητα A ενός δείγματος:

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t} \quad [8.10]$$

8.19. ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΟΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

Όταν ένας ατομικός πυρήνας υπόκειται σε ραδιενεργό διάσπαση, μια αυθόρμητη όσο και τυχαία διαδικασία, εκπέμπεται ακτινοβολία. Αν ο θυγατρικός πυρήνας δεν είναι σταθερός, η διαδικασία της ραδιενεργού διασπάσεως συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί σταθερότητα. Οι βασικοί τρόποι ραδιενεργού διασπάσεως είναι οι ακόλουθοι.

Ø *Άλφα διάσπαση.*

Η άλφα (α) διάσπαση είναι η αυθόρμητη εκπομπή από τον πυρήνα, ενός σωματιδίου άλφα. Το σωματίδιο α είναι γυμνός πυρήνας ηλίου που αποτελείται από δυο πρωτόνια και δυο νετρόνια. Το φαινόμενο είναι συχνό στα βαρέα νουκλίδια και συχνά συνοδεύεται από εκπομπή γ και χαρακτηριστικής X ακτινοβολίας. Η άλφα διάσπαση περιγράφεται από το παρακάτω σχήμα:



Ø *Βήτα-μείον διάσπαση.*

Στη βήτα-μείον (β^-) διάσπαση, ένα νετρόνιο του πυρήνα μετασχηματίζεται σε πρωτόνιο με την ταυτόχρονη εκπομπή ενός αρνητικά φορτισμένου σωματιδίου β^- (ηλεκτρόνιο) και ενός αντινετρίνου. Το φαινόμενο είναι συχνό στα νουκλίδια με περίσσεια νετρονίων σε σχέση με τα πρωτόνια του πυρήνα. Ραδιονουκλίδια που προέρχονται από πυρηνική σχάση διασπώνται κατά κύριο λόγο με τον τρόπο αυτό. Η βήτα μείον διάσπαση περιγράφεται από το παρακάτω σχήμα:

$$A_{ZX} \rightarrow A_{Z+1X} + \beta^{-} + \text{αντινεutrino} + \text{Ενέργεια} \quad [8.12]$$

Ø Βήτα-συν διάσπαση.

Στη βήτα-συν (β^+) διάσπαση, ένα πρωτόνιο του «φτωχού» σε νετρόνια πυρήνα, μετασχηματίζεται σε νετρόνιο με την ταυτόχρονη εκπομπή ενός θετικά φορτισμένου σωματίου β (ποζιτρόνιο) και ενός νετρίνου. Το φαινόμενο είναι συχνό στα νουκλίδια με περίσσεια νετρονίων σε σχέση με τα πρωτόνια του πυρήνα. Ραδιονουκλίδια που παράγονται σε επιταχυντές σωματιδίων διασπώνται κατά κύριο λόγο με τον τρόπο αυτό. Η βήτα μείον διάσπαση περιγράφεται από το παρακάτω σχήμα:

$$A_{ZX} \rightarrow A_{Z-1Y} + \beta^{+} + \text{νεutrino} + \text{Ενέργεια} \quad [8.13]$$

Ø Εξαύλωση ποζιτρονίου.

Το ποζιτρόνιο που απελευθερώνεται από μια αντίδραση της παραπάνω μορφής, αποθέτει την ενέργεια του στο μέσο διάδοσης του προκαλώντας διεγέρσεις και ιοντισμούς. Στο τέλος της διαδρομής και της ζωής του, αλληλοεπιδρά βίαια με ένα ηλεκτρόνιο του μέσου, το αντισωματίδιό του, με αποτέλεσμα η συνολική μάζα ηρεμίας των δύο σωματιδίων να μετατραπεί σε ενέργεια σύμφωνα με την εξίσωση του Einstein:

$$E = mc^2 \quad [8.14]$$

Η οποία αποδίδεται, λόγω και της αρχής διατήρησης της ορμής, σε δύο αντιδιαμετρικά εκπεμπόμενα φωτόνια. Το παραπάνω φαινόμενο έχει ενεργειακό κατώφλι τα $1.02\text{MeV} = 2 \times 511\text{keV}$, όπου 511keV είναι το ενεργειακό ισοδύναμο της μάζας ηρεμίας ενός σωματίου βήτα (συν ή μείον). Η βήτα-συν διάσπαση και η εξαύλωση ποζιτρονίου έχουν εφαρμογή, μέσω των ραδιοφαρμάκων που εκπέμπουν ποζιτρόνια, στην Ποζιτρονική Τομογραφία Εκπομπής.

Ø Διάσπαση με σύλληψη ηλεκτρονίου.

Στη διάσπαση με σύλληψη ηλεκτρονίου (electron capture), ένα εναλλακτικό σχήμα της βήτα (συν) διάσπασης των πτωχών σε νετρόνια $\rho\nu$, ο πυρήνας «συλλαμβάνει» ένα τροχιακό ηλεκτρόνιο μιας κοντινής στον πυρήνα στοιβάδας μέσω της μετατροπής ενός πρωτονίου σε νετρόνιο, με την ταυτόχρονη εκπομπή ενός Νετρίνου. Η διάσπαση με αρπαγή ηλεκτρονίου περιγράφεται από το σχήμα:

$$A_{ZX} + e \rightarrow A_{Z-1Y} + \text{Νεutrino} + \text{Ενέργεια} \quad [8.15]$$

Ø Ισομερής μετάβαση.

Κατά την ισομερή μετάβαση (isomeric transition), εκπέμπεται ακτινοβολία γ χωρίς την εκπομπή ή την πρόσληψη κάποιου σωματιδίου από τον/στον πυρήνα. Συμβαίνει κατά την αποδιέγερση διεγερμένων και άρα ασταθών καταστάσεων, στις οποίες μπορεί να βρεθούν οι πυρήνες κατά τη διάρκεια όλων των παραπάνω αναφερόμενων τύπων διασπάσεων. Οι διεγερμένες καταστάσεις, με χρόνους ημιζωής της τάξης των 10^{-12} έως και 10^2 y, ονομάζονται μετασταθερές (metastable) ή ισομερείς και αποδίδονται από το γράμμα m μετά τον μαζικό αριθμό του $\rho\nu$, π.χ. $99m_{Tc}$. Η ισομερής μετάβαση περιγράφεται από το σχήμα:

$$Am_{ZX} + e \rightarrow A_{ZX} + \text{Ενέργεια} \quad [8.16]$$

Ø Σχήματα διάσπασης.

Σχήμα διάσπασης ενός ρν ονομάζεται το διάγραμμα που αποδίδει γραφικά την οδό διάσπασης που ακολουθεί. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ένα γενικευμένο σχήμα διάσπασης που περιλαμβάνει τους τρόπους διάσπασης που αναφέρθηκαν παραπάνω.

8.20. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΩΝ

Τα ρν παράγονται συνήθως σε κυκλοτρόνια, πυρηνικούς αντιδραστήρες ή με γεννήτριες ρν. Παραγωγή ραδιονουκλιδίων σε κυκλοτρόνιο (cy-clotron) Στο κυκλοτρόνιο (cyclotron, τα ρν παράγονται ως «προϊόντα» του «βομβαρδισμού» σταθερών «στόχων» με φορτισμένα σωματίδια υψηλών ενεργειών.

8.21. ΚΥΚΛΟΤΡΟΝΙΟ

Το κυκλοτρόνιο είναι ένας κυκλικός επιταχυντής σωματιδίων στην έξοδο του οποίου τα σωματίδια, που έχουν προηγουμένως επιταχυνθεί, προσπίπτουν σε ακίνητους στόχους προκαλώντας πυρηνικές αντιδράσεις και παράγοντας ως προϊόντα ρν, σωματίδια και ακτινοβολίες. Στη συνηθέστερη περίπτωση, θετικά ιόντα που παράγονται στο κέντρο της διάταξης έλκονται και επιταχύνονται προς ένα αρνητικά φορτισμένο ημικυκλικό ηλεκτρόδιο που επειδή το σχήμα του μοιάζει με το αγγλικό γράμμα «D» αναφέρεται συνήθως ως «Dee».

Το κυκλοτρόνιο αποτελείται από δυο τέτοια ηλεκτρόδια τα οποία διαχωρίζονται από ένα μικρό κενό ανάμεσα τους ενώ η όλη διάταξη διατηρείται σε συνθήκες υψηλού κενού. Υπό την επίδραση ενός ισχυρού μαγνητικού πεδίου και ακολουθώντας τους νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού τα ιόντα διαγράφουν επιταχυνόμενα μέσα στα «Dee's», από διαφορές δυναμικού που αλλάζουν πολικότητα σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα, κυκλικές τροχιές (εξ ου και η προέλευση της λέξης «κυκλοτρόνιο») ολοένα και αυξανόμενης ακτίνας, μέχρι την έξοδο τους από τα «Dee's» και την πρόσκρουση στο στόχο.

8.22. ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΑ ΠΟΥ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΙ ΣΕ ΚΥΚΛΟΤΡΟΝΙΟ

Ως παράδειγμα ρν που παράγεται σε κυκλοτρόνιο μπορεί να αναφερθεί το ${}^{67}_{Ga}$, για το οποίο η αντίδραση παραγωγής εκφράζεται με τη σύντομη μορφή: ${}^{68}_{Zn} (p,2n) {}^{67}_{Ga}$, όπου, το ${}^{68}_{Zn}$ είναι το υλικό του στόχου που βομβαρδίζεται με πρωτόνια (p), απελευθερώνονται δύο νετρόνια (2n) και το ${}^{67}_{Ga}$ είναι το παραγόμενο ρν. Σε μερικές περιπτώσεις, όπως αυτές των ρν ${}^{201}_{Tl}$, ${}^{125}_I$ και ${}^{123}_I$, το παραγόμενο ρν της αντίδρασης είναι αρχικά διαφορετικό αλλά μεταπίπτει στο επιθυμητό μέσω ραδιενεργού διασπάσεως. Τα παραγόμενα σε κυκλοτρόνιο ρν είναι πτωχά σε νετρόνια και διασπώνται με εκπομπή ποζιτρονίου ή σύλληψη ηλεκτρονίου

8.23. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΩΝ ΣΕ ΠΥΡΗΝΙΚΟ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ

Η παραγωγή ρν που παράγονται σε πυρηνικό αντιδραστήρα γίνεται μέσω πυρηνικής σχάσης (nuclear fission), είτε, μέσω εκμετάλλευσης των νετρονίων του αντιδραστήρα, στην

ενεργοποίηση με νετρόνια (neutron activation). Το πλεονέκτημα των νετρονίων, ως σωματιδίων χωρίς φορτίο, είναι ότι εισέρχονται στον πυρήνα χωρίς να απαιτείται η επιτάχυνση τους σε υψηλές ενέργειες.

8.24. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΩΝ ΣΕ ΠΥΡΗΝΙΚΟ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΜΕΣΩ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΣΧΑΣΗΣ

Η πυρηνική σχάση είναι η θραύση ενός ατομικού πυρήνα σε δυο ελαφρότερους πυρήνες. Ενώ κάποιοι ασταθείς πυρήνες σπάζουν αυθόρμητα, κάποιοι άλλοι απαιτούν την προσφορά ενέργειας για να μπουν στη διαδικασία αυτή. Το μολυβδαίνιο (^{99}Mo), που αποτελεί πρώτη ύλη για τη γεννήτρια ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ που χρησιμοποιείται κατά κόρον στην Πυρηνική Ιατρική, είναι προϊόν σχάσης του ουρανίου (^{235}U).

8.25. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΩΝ ΣΕ ΠΥΡΗΝΙΚΟ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΜΕΣΩ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΝΕΤΡΟΝΙΑ

Τα νετρόνια που παράγονται κατά τη σχάση του ουρανίου σε ένα πυρηνικό αντιδραστήρα χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ρν μέσω του βομβαρδισμού με αυτά στόχων σταθερών πυρήνων τοποθετημένων μέσα στον αντιδραστήρα. Ο φώσφορος (^{32}P) που χρησιμοποιούνταν στο παρελθόν για θεραπείες και το χρώμιο (^{51}Cr) που χρησιμοποιείται στον προσδιορισμό του GFR, είναι παράδειγμα ρν που παράγονται μέσω ενεργοποίησης με νετρόνια.

8.26. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΩΝ ΣΕ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΩΝ

Οι γεννήτριες ρν αποτελούν εύχρηστα συστήματα παραγωγής ρν στα κατά τόπους εργαστήρια Πυρηνικής Ιατρικής. Για παράδειγμα, το $^{99\text{m}}\text{Tc}$, που λόγω του σχετικά μικρού χρόνου ημιζωής του των περίπου 6 ωρών δεν μπορεί να αποθηκεύεται για εβδομαδιαία χρήση, λαμβάνεται από μια γεννήτρια ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ σε καθημερινή βάση.

Άλλα παραδείγματα ρν που παράγονται από γεννήτρια ρν είναι το γάλλιο (^{68}Ga) που χρησιμοποιείται στην PET και παράγεται από μια γεννήτρια ^{69}Ga - ^{68}Ga , το ρουβίδιο (^{82}Rb) που χρησιμοποιείται επίσης στην PET και παράγεται από μια γεννήτρια ^{82}Sr - ^{82}Rb και το κρυπτό ($^{81\text{m}}\text{Kr}$) που παράγεται από μια γεννήτρια ^{81}Rb - $^{81\text{m}}\text{Kr}$.

8.27. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Όλοι οι ανιχνευτές ιοντιζουσών ακτινοβολιών βασίζονται στην αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη. Όπως είναι γνωστό, η ιοντίζουσα ακτινοβολία αποθέτει ενέργεια στην ύλη μέσω ιοντισμών και διεγέρσεων προκαλώντας μεταξύ άλλων χημικές μεταβολές ή εκπομπή ορατού φωτός, με το μεγαλύτερο πάντως ποσοστό να μετατρέπεται τελικά σε θερμότητα

8.28. ΤΥΠΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ

Οι ανιχνευτές ακτινοβολίας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με το είδος της πληροφορίας που παράγουν. Οι ανιχνευτές τύπου Geiger-Mueller που αποδίδουν τον αριθμό των αλληλεπιδράσεων που συμβαίνουν στον ανιχνευτή ονομάζονται μετρητές, οι ανιχνευτές που αποδίδουν πληροφορία για την ενεργειακή κατανομή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, όπως ο ανιχνευτής σπινθηρισμών NaI, ονομάζονται φασματόμετρα ενώ οι ανιχνευτές που αποδίδουν την ποσότητα της ενέργειας που αποτίθεται στον ανιχνευτή ονομάζονται δοσίμετρα.

Σε μια άλλη κατηγοριοποίηση μπορούμε να διαχωρίσουμε τους ανιχνευτές σύμφωνα με τη μέθοδο ανίχνευσης. Στους ανιχνευτές αερίου, τα ιόντα που παράγονται κατά την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με τον όγκο του αερίου που βρίσκεται μεταξύ δυο ηλεκτροδίων, συλλεγόμενα από τα ηλεκτρόδια, παράγουν ηλεκτρικό σήμα. Οι σπινθηριστές, είναι υλικά που κατά την αλληλεπίδραση τους με την ιοντίζουσα ακτινοβολία παράγουν φως, συνήθως στο ορατό ή στο υπεριώδες, το οποίο μέσω ειδικών συσκευών (φωτοπολλαπλασιαστές) μετατρέπεται επίσης σε ηλεκτρικό σήμα.

Οι ανιχνευτές ημιαγωγών (εξαιρετικά καθαροί κρύσταλλοι, συνήθως πυριτίου ή γερμανίου, εμπλουτισμένοι με μικροποσότητες άλλων ατόμων), λειτουργούν ως δίοδοι, δηλαδή, ως ηλεκτρονικές συσκευές που επιτρέπουν τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος που προκύπτει ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με τον κρύσταλλο και την επακόλουθη διέγερση των ηλεκτρονικών μόνο όταν η διαφορά δυναμικού στα άκρα τους έχει μια συγκεκριμένη πολικότητα.

Η απόδοση (efficiency) ενός ανιχνευτή αποδίδει τη δυνατότητα του να ανιχνεύει την ακτινοβολία. Τοποθετώντας μια πηγή ακτινοβολίας κοντά στον ανιχνευτή, η απόδοση του προκύπτει από το λόγο των σωματιδίων ή φωτονίων που ανιχνεύονται προς αυτά που εκπέμπονται.

- Ανιχνευτές αερίου: στους ανιχνευτές του τύπου αυτού περιλαμβάνονται οι θάλαμοι ιοντισμού (ion chambers), οι αναλογικοί μετρητές (proportional counters) και οι μετρητές τύπου Geiger-Mueller.
- Ανιχνευτές σπινθηρισμών: στους ανιχνευτές του τύπου αυτού περιλαμβάνονται διάφοροι ανόργανοι κρυσταλλικοί σπινθηριστές που χρησιμοποιούνται στην ακτινολογία, οι φωτοπολλαπλασιαστές, οι φωτοδίοδοι και, ως σπινθηριστές που παγιδεύουν τα διεγερμένα ηλεκτρόνια, τα δοσίμετρα θερμοφωταύγειας και οι φωτοδιεγερόμενοι φώσφοροι.
- Ανιχνευτές ημιαγωγών: είναι δίοδοι ημιαγωγών σχεδιασμένοι για ανίχνευση ακτινοβολίας. Χρησιμοποιούνται ευρύτατα για την ταυτοποίηση των επιμέρους ρν που βρίσκονται σε ένα δείγμα λόγω της εξαιρετικής τους ενεργειακής διακριτικής ικανότητας.

9. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΒΙΟΧΗΜΕΙΑ ΚΑΙ ΡΑΔΙΟΧΗΜΕΙΑ

9.1. ΟΡΙΣΜΟΙ

Η χημεία είναι η επιστήμη των χημικών αντιδράσεων, η οποία μελετά τις χημικές ιδιότητες, τη σύνθεση και τη δομή του μορίου. Όταν πρόκειται για βιολογικό μόριο, όπως είναι οι πρωτεΐνες, οι υδατάνθρακες, τα λιπίδια και τα πυρηνικά οξέα, η χημεία ονομάζεται Βιοχημεία. Όταν το μόριο είναι ραδιενεργό η χημεία ονομάζεται Ραδιοχημεία ή Ραδιοβιοχημεία, η οποία μελετά και τα ραδιοφάρμακα (ρφ). Το κεφάλαιο αυτό της Ραδιοβιοχημείας μελετά βασικά θέματα και πειραματικά δεδομένα των ρφ. Για να αντιληφθούμε ποιες είναι οι ιδιότητες των ρφ και πώς δρουν κατά τις εφαρμογές αυτών στην πυρηνική ιατρική, είναι απαραίτητο να μελετήσουμε τους χημικούς δεσμούς των διαφόρων ρφ. Οι χημικοί δεσμοί. Για να σχηματιστεί ένα μόριο από π.χ. 2 ή περισσότερα άτομα απαιτείται μια δύναμη έλξης μεταξύ τους που ονομάζεται «χημικός δεσμός».

9.2. ΟΙ ΒΙΟΧΗΜΙΚΟΙ ΔΕΣΜΟΙ

Σθένος (valence-valency): είναι η δυναμική της σύνθεσης ενός χημικού στοιχείου, όπως μετράται από τον αριθμό των ατόμων υδρογόνου που μπορεί να μετακινήσει (displace) ή να συνδεθεί μαζί τους.

Ιοντίζω ένα άτομο κατιούσα σημαίνει ότι το μετατρέπω σε ιόν ή ιόντα κατά τυπικό τρόπο αποσπώντας ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια.

Ο ομοιοπολικός δεσμός (covalent): είναι ο ισχυρότερος δεσμός και αφορά άτομα που μοιράζονται και μεταφέρουν μεταξύ τους κάποια ηλεκτρόνια. Οι ομοιοπολικοί δεσμοί συγκρατούν τα άτομα στα μόρια των κρυστάλλων, μετάλλων, βιομορίων και μακρομορίων.

Ετεροπολικός δεσμός (non-covalent): είναι ασθενέστερος και αφορά μόνιμο διαχωρισμό φορτίων (δίπολα προς δίπολα) μεταξύ των συνδεόμενων ατόμων που διαθέτουν μεγάλο ηλεκτροστατικό φορτίο, π.χ. ο υδρογονικός δεσμός. Οι ετεροπολικοί ονομάζονται και ιοντικοί δεσμοί.

Οι δυνάμεις Vanderwaald είναι πολύ ασθενείς, μη ηλεκτροστατικές δυνάμεις έλξης ατόμων προς σχηματισμό μορίων.

Βιομόρια όπως είναι το δεσοξυ-ριβοζο-πυρηνικό οξύ (DNA) και οι πρωτεΐνες εκδηλώνουν δομές τρισδιάστατες λόγω της παρουσίας των ασθενών Υδρογονικών δεσμών. Οι δομές αυτές έχουν διαφορετική γεωμετρία μεταξύ τους, διαφορετική ένταση και ειδικότητα και επηρεάζονται σαφώς από την παρουσία νερού.

Ο κύριος παράγον που διακρίνει τους χημικούς από τους βιοχημικούς δεσμούς είναι το διαλυτικό μέσο στο οποίο βρίσκονται τα βιοχημικά μόρια, άτομα ή ουσίες και το οποίο συνήθως είναι το νερό. Εντός του νερού αναπτύσσονται ασθενείς δυνάμεις.

Για να παράγουμε ένα ρφ πρέπει να υπάρχει μεταξύ του ραδιενεργού ατόμου και του βιομορίου χημική συμβατότητα, π.χ. το ^{111}In έχει συμβατότητα διότι συνδέεται με δεσμούς ομοιοπολικούς με το DTPA. Το DTPA είναι «χειλική» ένωση και διαθέτει άτομο O_2 με απομακρυσμένα ζεύγη ηλεκτρονίων, τα οποία δίνονται για το σχηματισμό ενός ομοιοπολικού δεσμού ώστε τελικά έχουμε το $^{111}\text{In} - \text{DTPA}$.

Η ενέργεια που εκπέμπει το ρφ μπορεί να είναι γ- ή β- ανάλογα αν το χρησιμοποιούμε για διάγνωση ή θεραπεία. Στη θεραπευτική χρησιμοποιούνται επίσης ρφ που εκπέμπουν ηλεκτρόνια Auger, τα οποία έχουν μεγάλη γραμμική μεταφορά ενέργειας-linear energy transfer (LET).

Το ρφ πρέπει να προσηλώνεται στο στόχο-όργανο ή στον όγκο κλπ. σε πολύ μεγαλύτερη ειδική συγκέντρωση από ότι εκτός αυτού, δηλαδή χαμηλό background. Έτσι με μικρή δόση του ρφ θα έχουμε καλή εικόνα ή θεραπεία χωρίς επιβλαβή ακτινοβολία ολόκληρου του σώματος. Αυτό εκφράζεται ως ο λόγος της συγκέντρωσης του ρφ στο στόχο/προς το μη στόχο, δηλαδή προς το background (targetonontargetratio).

Επίσης απαιτείται η χημική και η ακτινολογική σταθερότητα του ρφ, ώστε να παραμένει στο στόχο όσο διάστημα χρειάζεται για να φέρει αποτέλεσμα.

Το ρφ πρέπει να συντεθεί με τη σωστή στοιχειομετρία, δηλαδή με σωστές αναλογίες ρφ και βιομορίου. Σε αντίθετη περίπτωση επηρεάζεται η χημική του σταθερότητα. Επίσης πρέπει να έχει το σωστό μοριακό βάρος για να πετύχει η εξέταση ή η θεραπεία, π.χ. με μ.β. μεγαλύτερο από 60.000 Dalton στο ρφ δε θα διέρχεται από τα εσπειραμένα σωληνάκια των νεφρών.

9.3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΗΣ ΟΥΣΙΩΝ

- a. Η άμεση μέθοδος που είναι και η πιο απλή, γρήγορη και συνήθως εφαρμοζόμενη αφορά τα εξής: Πρώτα γίνεται σχετική χημική επεξεργασία στο βιομόριο αλλά και στο ραδιενεργό νουκλίδιο, π.χ. η επισήμανση μιας πρωτεΐνης με το τεχνητό ^{99m}Tc προϋποθέτει να δράσει ένας αναγωγικός παράγοντας στην πρωτεΐνη όπως είναι ο χλωριούχος κασσίτερος, ο οποίος ανάγει το δισουλφιδικό δεσμό των πρωτεϊνών και τις μετατρέπει σεθειόλες. Ο ίδιος χλωριούχος κασσίτερος μειώνει το οξειδωτικό σθένος του ^{99m}Tc ώστε να υποβοηθήσει τη δέσμευση του ^{99m}Tc από την πρωτεΐνη.
- b. Αν δεν αποδίδει η άμεση μέθοδος, εφαρμόζουμε τη μέθοδο της προ-επισήμανσης με το ρφ. Χρησιμοποιούμε έναν τρίτο παράγοντα εκτός του ρφ και του βιομορίου, ο οποίος δρα ως ενδιάμεσο και ονομάζεται: χειλικός παράγων επισήμανσης διπλής δράσης - bifunctional chelating agent (BECA) που σχηματίζει ένα σύμπλοκο με το ρφ ώστε να διευκολύνει την τελική σύνδεση του ραδιονουκλιδίου (ρν) με το βιομόριο, π.χ. το ^{99m}Tc σχηματίζει πρώτα ένα σύμπλοκο έστω με μια χημική ουσία και έτσι ευνοείται η σύνδεση με το βιομόριο.
- c. Προ-επισήμανση με το βιομόριο. Η BECA συνδέεται πρώτα με το βιομόριο σε σύμπλοκο, το οποίο στη συνέχεια επισημαίνεται με ρν, π.χ. η BECA σχηματίζει σύμπλοκο με άτομα N ή C ή με κάποια άλυσια της πρωτεΐνης-βιομορίου και μετά το σύμπλοκο αυτό επισημαίνεται με ρν, π.χ. ^{99m}Tc με την παρουσία του αναγωγικού χλωριούχου αντιμονίου ώστε τελικά να σχηματιστεί το ρφ depreotide- ^{99m}Tc .
- d. Λιγότερο χρησιμοποιούνται οι εξής μέθοδοι: (α) Η βιοσύνθεση, κατά την οποία το ρφ παράγεται in vivo, π.χ. Σεκαλιέργεια του στρεπτομύκητα griseous. Προσθέτουμε στην καλλιέργεια βιταμίνη B12 και ^{60}Co ή ^{57}Co και η σύνδεση των δύο γίνεται in vivo. Επίσης έτσι επισημαίνουμε τη μόνο-δι-τρι-ή-τετρα-ιωδοτυροσίνη (MIT, DIT, T3 και T4), δηλαδή αν ενέχουμε ενδοφλεβίως σε επίνυ ή σε μυ το βιομόριο της τυροσίνης και το ^{123}I - ^{131}I . (β) Η φυσική μετατροπή, π.χ. κατά την έκπτωση της ραδιενέργειας του ^{123}Xe παράγεται το θυγατρικό ^{123}I , αλλά η απόδοση της μεθόδου αυτής είναι σχετικά μικρή. Μπορούμε

επίσης να εκθέσουμε κάποια Βιομόρια στο ^{123}Xe οπότε καθώς εκπίπτει προς ^{123}I , τα Βιομόρια θα επισημανθούν με το ^{123}I . (γ) Η εκπομπή σωματιδίων από μια πυρηνική αντίδραση. Τα σωματίδια πλήττουν άτομα και σχηματίζουν ραδιενεργά άτομα ή ραδιενεργά ιόντα, τα οποία με τη σειρά τους συνδέονται με Βιομόρια που έχουμε τοποθετήσει σε κατάλληλες θέσεις πλησίον αυτών και σχηματίζουν τελικά ρφ.

9.4. ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΩΝ Ρφ

Αφορά τον έλεγχο της αυθεντικότητας, της χημικής καθαρότητας, του pH, του μεγέθους των μορίων, της ποιότητας της ακτινοβολίας, της ραδιοχημικής καθαρότητας και της διάρκειας ζωής των ρφ. Μερικές μεθόδους αναφέρουμε παρακάτω.

- Η χρωματογραφία λεπτής στοιβάδας, για να ελέγξει τη ραδιοχημική καθαρότητα. Το ρφ κινείται και κατά την κίνηση του προς το ένα άκρο του χρωματογραφικού υλικού διαχωρίζεται σε συστατικά με την επίδραση τριχοειδικών δυνάμεων. Η απόσταση που διανύει κατά τη διαδρομή αυτή το κάθε συστατικό του ρφ ονομάζεται: τιμή Rf
- Η χρωματογραφία σε ζέλη. Χρησιμοποιείται και αυτή για τη ραδιοχημική καθαρότητα, με το ίδιο σκεπτικό όπως και η προηγούμενη.
- Η γνωστή ηλεκτροφόρηση. Χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό των ανόργανων προσμίξεων του ρφ. Τα συστατικά και οι προσμίξεις του ρφ διανύουν κάποιες αποστάσεις επί του χάρτου ή επί της πολυακρυλαμίδης-ζέλης της ηλεκτροφόρησης ανάλογα με το φορτίο των προσμίξεων αυτών.

9.5. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΡΑΔΙΟΕΠΙΣΗΜΑΝΣΗ

Αυτοί είναι προστιθέμενοι παράγοντες ή τυχαία ευρισκόμενοι στο διάλυμα επισήμανσης των ρφ και αφορούν αντιοξειδωτικές ουσίες, καταλύτες, επιταχυντές χημικών αντιδράσεων, διαλύτες, αδρανείς ουσίες κ.α., π.χ. ο χλωριούχος κασσίτερος ως αναγωγική ουσία αν ευρεθεί σε περίσσεια μπορεί τελικά να δώσει αδιάλυτο οξείδιο του τεχνητίου.

Επίσης μπορεί να έχουμε διάσπαση του ρφ τύπου ραδιόλυση. Όσο πιο υψηλή είναι η ειδική ραδιενεργός ενεργότητα ενός ρφ, τόσο πιο μεγάλη είναι η σχετική ραδιόλυση. Για να αποφύγουμε τη ραδιόλυση πρέπει το pH του διαλύματος του ρφ να είναι ουδέτερο, για αυτό χρησιμοποιούνται ρυθμιστικά διαλύματα. Η ημιζωή του ρφ και η τυχόν υψηλή του ραδιενέργεια επηρεάζουν επίσης σημαντικά τη ραδιόλυση.

Οι συνθήκες αποθήκευσης μπορεί να αλλοιώσουν τη σύσταση των πρωτεϊνών, των λιπιδίων ή των υδατανθράκων κ.α. που ως Βιομόρια συνδέονται με το ρν. Ιδιαίτερα οι υψηλές θερμοκρασίες αλλοιώνουν τα Βιομόρια και διασπούν τα ρφ. Επίσης το φως διασπά τους χημικούς δεσμούς των ρφ. Τέλος, άλλοι παράγοντες, όπως αντιοξειδωτικές ουσίες: ασκορβικό οξύ, γεντισικό οξύ ή π-αμινοβενζοϊκό οξύ που συχνά προστίθεται στα διαλύματα των ρφ για να διατηρήσουν την επιθυμητή αναγωγική δράση, π.χ. του χλωριούχου κασσίτερου, μπορεί να συμβάλλουν στη διάσπαση του ρφ.

Άλλες ουσίες όπως μακρομόρια-καταλύτες που προστέθηκαν στο ρφ για να επιταχύνουν τη σύνδεση του ρν με το βιομόριο ή ουσίες που ελαττώνουν την επιφανειακή τάση των συμπλοκών όταν αυτά είναι λιπόφιλα για να τα κάνουν ευδιάλυτα συμβάλλουν στη διάσπαση του ρφ, π.χ το ^{99m}Tc - MIBI και το ^{99m}Tc - MAA μπορεί να περιέχουν τις

παραπάνω ουσίες και έτσι να αλλοιωθεί και να καταστεί αδρανής η χημική σύνθεση του βιομορίου και το όλο ρφ.

9.6. ΤΑ ΒΙΟΜΟΡΙΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΑ RF

- a. Πεπτίδια με χαμηλό μ.β., π.χ. 5-15 αμινοξέα, με χαμηλή ανοσολογική αντίδραση και ικανοποιητικές φαρμακολογικές ιδιότητες. Φυσικά πεπτίδια που συνήθως χρησιμοποιούνται στο σχηματισμό ρφ είναι τα εξής: Νευροτενσίνη-ουσία Ρ-γαστρίνη-παράγωγα της σωματοστατίνης. Άλλα πεπτίδια παράγονται στο εργαστήριο. Ένα παράδειγμα φυσικού πεπτιδίου είναι η σωματοστατίνη που αλλοιώθηκε για να δώσει ως παράγωγο αυτής το οκτρεοτίδιο (sand statin), που είναι κυκλικό πεπτίδιο με μόνο 8 αμινοξέα σε σχέση με τη σωματοστατίνη που έχει 14 αμινοξέα.
- b. Πρωτεΐνες και αντισώματα. Λιγότερο χρησιμοποιούνται στη σύνθεση των ρφ οι πρωτεΐνες-αντισώματα. Αυτά είναι συνήθως μόρια σε σχήμα Y που αποτελούνται από 2 όμοιες βεριές και 2 ελαφρές αλύσεις πολυπεπτιδίων, οι οποίες συνδέονται στερεά με ομοιοπολικό δεσμό A προς δισουλφίδια. Όταν είναι μονοκλωνικά τα αντισώματα είναι ειδικά και έτσι χρησιμοποιούνται συχνά συνδεδεμένα με **131** – **123** – **124_I**, και με **99m_{Tc}**. Οι συνήθως χρησιμοποιούμενες για το σχηματισμό αυτό πρωτεΐνες αναφέρονται στον Πίνακα 17 ενώ τα αντίστοιχα μονοκλωνικά αντισώματα στον Πίνακα 18.
- c. Τα ολιγονουκλεοτίδια. Μικρά τμήματα του mRNA είναι ολιγονουκλεοτίδια που χρησιμοποιούνται για να συνδεθούν με ενδογενή γονίδια στο επίπεδο της αντιγραφής (transcription level), π.χ. οι αθηροσκληρωτικές πλάκες επισημαίνονται με **99m_{Tc}** αντι-ολιγονουκλεοτίδια (antisense). Το πιο σημαντικό μειονέκτημα των ολιγονουκλεοτιδίων είναι ότι προσβάλλονται in vivo από νουκλεάσες και για αυτό επινοήθηκαν ειδικές σταθεροποιητικές ουσίες.
- d. Οι υποδοχείς της ντοπαμίνης που χρησιμοποιούνται για απεικόνιση. Ο μεταφορέας της ντοπαμίνης (dop amine transporter - DAT) επισημαίνεται με **99m_{Tc}** και απεικονίζει αντίστοιχες θέσεις υποδοχέων του κεντρικού νευρικού συστήματος. Ανάλογες έρευνες γίνονται για την εφαρμογή ρφ που να απεικονίζουν τους υποδοχείς της σεροτονίνης και της ακετυλοχολίνης.

-Ανεξίνη – Γλυκοζυλο - νεογλυκοαλβουμίνη (NGA) -Ιντερλευκίνες - Πεπτίδιο που ενεργοποιεί τα ουδετερόφιλα (NAP) -Αιθυλκυστεϊνικό (EC) - Διαιθυλενοτριαμινο πενταοξικό οξύ (DTPA) -Ανθρώπινη αλβουμίνη του ορού (HAS)-Οξικός ινοβλαστικός παράγων ανάπτυξης (FGF-1)

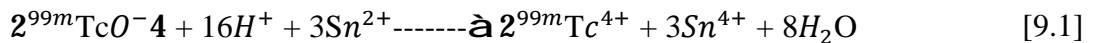
Πίνακας 17: Πρωτεΐνες για μοριακή απεικόνιση

-Αθροίσματα διαφοροποίησης αντιγόνων λεμφοκυττάρων (clusterofdifferentiation) <i>CD_{4m}</i> - <i>CA125</i> - -Επιδερμικός παράγων ανάπτυξης (EGFR)- -Γλυκοπρωτεΐνη όγκων (TAG)- Μυοσίνη

Πίνακας 18: Μονοκλωνικά αντισώματα για μοριακή απεικόνιση

Η χημική συμπεριφορά του **99m_{Tc}**

Το ^{99m}Tc χρησιμοποιείται κατά 80% σαν ρν σε όλο τον κόσμο λόγω του ότι είναι εύκολο διαθέσιμο, καθαρό, δηλαδή με ακτινοβολία μόνο 140 keV, με T/2 6h και χωρίς φορέα. Είναι ένα μεγάλο-μόριο, χρώματος άργυρού-γκρίζου, παράγεται από την έκπτωση του ^{99}Mo και ανήκει στην ομάδα VIIB του περιοδικού συστήματος. Έχει ατομικό αριθμό 43, 8 οξειδωτικά επίπεδα 0 και 1-7+, στα οποία καταλήγει χάνοντας κάποια ηλεκτρόνια από τις 4d και 5d στιβάδες του ή προσλαμβάνοντας ένα ηλεκτρόνιο στην 4d στιβάδα. Τα πιο σταθερά επίπεδα του είναι τα 7,5,4,3,1 και 0. Με την έκλυση του από τη στήλη ^{99}Mo χρησιμοποιώντας φυσιολογικό ορό συνδέεται με το οξυγόνο προς υπερτεχνητικού ανιόν ($^{99m}\text{TcO}^{-4}$). Άρα για να συνδεθεί με βιομόρια πρέπει να φύγει από το οξειδωτικό στάδιο, δηλαδή να αναχθεί σύμφωνα με τον τύπο:



Στην εξίσωση αυτή το $\text{SnCl}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ που συνήθως προστίθεται σε μεγάλη περίσσεια έχει μειώσει το οξειδωτικό σθένος του ^{99m}Tc από το 7^{+} στο 4^{+} , το οποίο συνδέεται με βιομόρια και μάλιστα με τις αλύσεις αυτών: COO^{-} , OH , NH_2 και SH . Συγκεκριμένα το DTPA προσφέρει ένα ζεύγος απομακρυσμένων ηλεκτρονίων και συνδέεται με ομοιοπολικό δεσμό με το αναχθέν ^{99m}Tc .

Το SnCl_2 υπερέχει όλων των άλλων αναγωγικών ουσιών όπως ο χλωριούχος σίδηρος και το ασκορβικό οξύ, διότι δεν είναι τοξικό, δρα σε ισότονο διάλυμα και σε θερμοκρασία δωματίου και παραμένει σταθερό όταν λυοφιλίζεται ή όταν διατηρείται σε περιβάλλον αζώτου.

Το pH, το ιοντικό σθένος και η λιποδιαλυτότητα. Το pH στο αίμα μας κυμαίνεται από 7,2-7,4 λόγω της μεγάλης ικανότητας του αίματος να δρα ως ρυθμιστικό διάλυμα. Για να έχουμε σταθερό και ορισμένο ιοντικό σθένος, ωσμωτική πίεση και ισοτονικότητα προσθέτουμε στο διάλυμα του ρφ οξύ, αλκάλι ή ηλεκτρολύτες. Η λιποδιαλυτότητα του ρφ, η οποία το υποβοηθά να προσληφθεί, π.χ. από την κυτταρική μεμβράνη που αποτελείται κυρίως από φωσφολιπίδια, έχει στις περιπτώσεις αυτές ιδιαίτερη σημασία.

10. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΕΙΔΙΚΟΤΕΡΑ ΘΕΜΑΤΑ ΡΑΔΙΟΒΙΟΛΟΓΙΑΣ, ΡΑΔΙΟΧΗΜΕΙΑΣ. Η ΑΚΤΙΝΙΚΗ ΝΟΣΟΣ

10.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο γιατρός θα κρίνει με γνώμονα το συμφέρον του εξεταζόμενου σε ποια εξέταση θα υποβληθεί ο εξεταζόμενος π.χ. όταν ο ασθενής παρουσιάζει οσφυαλγίες και θωρακαλγίες με αντίστοιχα ριζίτικα φαινόμενα και με ιστορικό προστατισμού τότε μεταξύ άλλων εξετάσεων μπορεί να ζητηθεί σπινθηρογράφημα οστών που όπως γνωρίζουμε δείχνει 2-3 χρόνια πριν από την ακτινολογική εξέταση τις πολλαπλές οστικές μεταστάσεις (superscan). Ο γιατρός έτσι μπορεί να γνωρίζει αν οι μεταστάσεις στην παραπάνω περίπτωση είναι οστικές ή μυελικές, ώστε να ορίσει την περαιτέρω αντιμετώπιση τους.

Όπως γνωρίζουμε σήμερα από τη Ραδιοβιολογία, κεντρική θέση στα σημεία ακτινοβολήσεως κατέχουν χημικές αντιδράσεις, οι οποίες συμβαίνουν λόγω σχηματισμού ιόντων. Οι χημικές αυτές αντιδράσεις έχουν ως αποτέλεσμα δομικές και λειτουργικές βλάβες στο σύμπλοκο μοριακό σύστημα των κυττάρων.

Η τύχη των ρν που εισέρχονται στον οργανισμό (εσωτερική ακτινοβολήση) θα εξαρτηθεί από τις χημικές τους ιδιότητες και τις αντιδράσεις τους με τα φυσικά μόρια του κυττάρου.

10.2. ΡΑΔΙΟΒΙΟΛΟΓΙΑ – ΡΑΔΙΟΧΗΜΕΙΑ - ΑΚΤΙΝΙΚΗ ΝΟΣΟΣ

Μερικά ραδιενεργά στοιχεία διασκορπίζονται σε ολόκληρο τον οργανισμό, ενώ άλλα συγκεντρώνονται σε μεγάλες πυκνότητες σε ορισμένα όργανα, ανάλογα με το βιολογικό τους μεταβολισμό, όπως το ιώδιο στο θυρεοειδή αδένα και τα ρν του ασβεστίου, στροντίου και ραδίου στα οστά. Ραδιονουκλίδια (ρν) που έχουν μακρό χρόνο ημιζωής και αποτίθενται στο σκελετό παραμένουν εκεί για πολλά έτη αποτελώντας έτσι μια συνεχή «εσωτερική» πηγή ακτινοβολίας. Σύμφωνα με μελέτες του περιεχομένου όλων των βασικών ειδών διατροφής, σε ένα πυρηνικό ή άλλο ραδιενεργό ατύχημα, όπου αναμένουμε να υπάρχουν στο έδαφος επικίνδυνα ραδιενεργά στοιχεία του ^{131}I , ^{89}Sr και ^{137}Cs , μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ως τροφή στις ελιές, το λάδι και τη ζάχαρη, διότι κατά την παραγωγή και επεξεργασία τους δεν προσλαμβάνουν από το έδαφος κανένα από τα παραπάνω ραδιενεργά στοιχεία, εφόσον βέβαια δε μολύνθηκαν επιφανειακά από τη ραδιενεργό επίπτωση.

Η υπεριώδης ακτινοβολία (ultraviolet-UV, Σερέφογλου Α, Προυκάκης Χ. Υπεριώδης ακτινοβολία 1988). Ένα είδος ακτινοβολίας που μπορεί να προκαλέσει βλάβες στους οργανισμούς είναι η υπεριώδης ακτινοβολία. Ο τρόπος με τον οποίο δρα είναι διαφορετικός από εκείνον της ιοντίζουσας ακτινοβολίας. Τα φωτόνια της υπεριώδους ακτινοβολίας δρουν κατ'ευθείαν σε ειδικά μόρια των κυττάρων και προκαλούν με αυτόν τον τρόπο φωτοχημικές αντιδράσεις στο κυτταρικό επίπεδο. Μερικές από αυτές είναι επωφελείς για το κύτταρο όπως η μετατροπή της προβιταμίνης σε βιταμίνη D3. Άλλες όμως είναι βλαβερές και ο βαθμός της βλάβης εξαρτάται από το χρόνο επίδρασης της ακτινοβολίας και κυρίως από το μήκος

κύματος αυτής. Το δραστικότερο μήκος κύματος για τους περισσότερους ιστούς κυμαίνεται μεταξύ 2500 και 3000 Å. Η έκθεση των ματιών χωρίς προστασία σε UVακτινοβολία προκαλεί βαριά μορφή επιπεφυκίτιδα. Χρόνια έκθεση οδηγεί σε πρόωμο γήρας των κυττάρων της επιδερμίδας, σε προ καρκινικές καταστάσεις ή ακόμη και σε βασικό κυτταρικό καρκίνωμα του δέρματος. Αντιδράσεις του δέρματος του τύπου της φωτοχημικής ή φλυκταινώδους δερματίτιδας δεν είναι σπάνιες.

Οι ακτινοβολίες μικροκυμάτων. Έχουν παρατηρηθεί βλάβες των ιστών (καταρράκτης, εγκαύματα της επιδερμίδας) μετά από έκθεση σε μεγάλες δόσεις ακτινοβολίας μικροκυμάτων. Ο μηχανισμός προκλήσεως των βλαβών αυτών από αυτό το είδος της ακτινοβολίας δεν είναι πλήρως διευκρινισμένες παρόλο που πολλές ενδείξεις συνηγορούν για έναν παρόμοιο μηχανισμό όπως και στα άλλα είδη των ακτινοβολιών.

Ανεξάρτητα από το είδος της ακτινοβολίας, έχουμε τις εξής:

- a. Στο κύτταρο, τη ραδιόλυση είναι γνωστό ότι το κύτταρο αποτελείται κατά ένα μεγάλο ποσοστό από νερό. Το νερό είναι απαραίτητο τόσο ως λειτουργικό μόριο στις διάφορες βιοχημικές αντιδράσεις, όσο και ως κύριο συστατικό για τη διατήρηση της κολλοειδωσμοτικής ισορροπίας. Τα πρωτεϊνικά μόρια περιβάλλονται από ένα «μανδύα» νερού ενώ το DNA του πυρήνα από ένα «μανδύα» πρωτεϊνών.

Κατά την πρόπτωση της ακτινοβολίας σε ένα κύτταρο, το νερό υφίσταται ραδιόλυση, η οποία είναι τόσο εντονότερη όσο περισσότερο οξυγόνο είναι διαλυμένο στο νερό (ραδιοχημική φάση). Κατά τη ραδιόλυση αποσπάται ένα ηλεκτρόνιο από το μόριο του νερού ($H_2O \rightarrow H_2O^+ + e^-$). Τα ιοντισμένα μόρια του νερού αντιδρούν μεταξύ τους και σχηματίζονται ρίζες: ($H_2O \rightarrow H^+ + OH^0, e^- + H_2O \rightarrow H^0 + OH^- =$ φυσικοχημική φάση). Οι ρίζες που σχηματίζονται είναι πολύ βραχύβιες ($10^{-6}sec$) αλλά πολύ δραστικές. Φυσιολογικά δε συναντώνται στους ιστούς και για αυτό είναι τοξικές.

Στην επόμενη φάση, τη χημική φάση, οι ρίζες αντιδρούν μεταξύ τους και σχηματίζουν υπεροξείδιο του υδρογόνου ($2OH \rightarrow H_2O_2$) ή αντιδρούν με άλλα ενδοκυττάρια μόρια και σχηματίζονται τοξικά προϊόντα για το κύτταρο (οξέα, αλκοόλες, αλδεΐδες). Όλα αυτά τα προϊόντα της άμεσης ή έμμεσης ραδιόλυσης του νερού προκαλούν σημαντικές ραδιοχημικές αλλοιώσεις στα μακρομόρια των κυττάρων.

- b. Στις πρωτεΐνες μπορεί να προκληθεί διάσπαση του πεπτιδικού δεσμού ή άτυπες συνδέσεις μεταξύ διαφορετικών πεπτιδικών αλυσίδων. Αν πρόκειται για λειτουργική πρωτεΐνη όπως ένα ένζυμο, τότε αυτό χάνει σε μεγάλο βαθμό ή εξ ολοκλήρου τη δραστικότητα του και προκύπτει υπόστρωμα που δεν μπορεί να μεταβολιστεί περαιτέρω. Η επίδραση των ριζών στα πρωτεϊνικά μόρια έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ενδιάμεσων τοξικών προϊόντων αποδομής τους που δε μεταβολίζονται μέχρι τέλους. Τα προϊόντα αυτά ενεργοποιούν λυσοσωματικά ένζυμα. Αυτή η ενεργοποίηση μπορεί να καταλήξει σε πλήρη καταστροφή (αυτοπεψία) του κυττάρου. Οι πρωτεΐνες εκτός από λειτουργικά είναι και δομικά συστατικά του κυττάρου. Μετέχουν στην κατασκευή των μεμβρανών των οργανιδίων, του ενδοπλασματικού δικτύου κλπ. Η λειτουργία όλων αυτών επηρεάζεται σημαντικότερα από την αλλοίωση των πρωτεϊνών τους.
- c. Μια σημαντική ομάδα μακρομορίων που υφίσταται την τοξική επίδραση των ριζών είναι τα νουκλεϊνικά οξέα (NO). Κατά παρόμοιο τρόπο όπως και στις πρωτεΐνες δημιουργούνται άτυπες συνδέσεις μέσα στην ίδια αλυσίδα (π.χ. διμερή θυμίνης) ή μεταξύ διαφορετικών αλυσίδων.

Εφόσον η βλάβη είναι σοβαρή και το κύτταρο δεν είναι σε θέση να την επιδιορθώσει με τους μηχανισμούς που διαθέτει, τότε απονεκρώνεται. Στις περιπτώσεις που οι βλάβες είναι μικρές και εστιακές, οδηγούν σε μεταλλάξεις. Μεταλλάξεις των αυτοσωματικών χρωματοσωμάτων κληρονομούνται στα θυγατρικά τους κύτταρα και μπορούν να αποτελέσουν την απαρχή μιας κακοήθους εξαλλαγής (καρκίνος του δέρματος). Αν όμως οι βλάβες αφορούν τα γαμετοκύτταρα τότε μπορεί να κληρονομούνται στις επόμενες γενιές με άλλοτε άλλες συνεπείς για τους φορείς. Κλασικό παράδειγμα, οι απώτερες συνέπειες στα άτομα που επέζησαν από την ατομική βόμβα και στους απογόνους αυτών των ατόμων που παρουσίασαν ποικίλες σωματικές και γενετικές βλάβες.

Μετά από ακτινοβόληση, ο πυρήνας εμφανίζεται πυκνωτικός, συνέπεια της δράσης της ακτινοβολίας τόσο στις ιστόνες, οι οποίες μετουσιώνονται, όσο και στο ίδιο το DNA, το οποίο αποπολυμερίζεται. Ένας τέτοιος πυρήνας μπορεί να επιτελέσει έναν περιορισμένο αριθμό μιτωτικών διαιρέσεων, οι οποίες κατά κανόνα είναι άτυπες, σύντομα όμως παύει η μιτωτική διαδικασία. Ιδιαίτερη ευαισθησία παρουσιάζει το κύτταρο κατά την αρχή της πρόφασης, όταν δηλαδή γίνεται ο διπλασιασμός του DNA. Σε περίπτωση ισχυρής ακτινοβόλησης παρατηρείται Καρυορρηξία, δηλαδή λύση του πυρηνικού περιβλήματος και άμεσος θάνατος του κυττάρου. Στο κυτταρόπλασμα παρατηρούνται κενोटόπια συνέπεια καταστροφής πρωτεϊνών και άλλων μακρομορίων αφ ενός και αυξημένης συγκεντρώσεως ενδοκυτταρίου νερού αφ ετέρου. Επίσης παρατηρείται συχνά αύξηση του ενδοκυτταρίου λίπους και αμυλοειδών ουσιών σαν αποτέλεσμα ελαττωματικής ενζυμικής δράσης. Η εξοίδηση του κυττάρου που παρατηρείται οφείλεται στην αυξημένη διαβατότητα της κυτταρικής μεμβράνης για το νερό.

Σε κύτταρα που εμφανίζουν κινητικότητα (σπερματοζώαρια) παρατηρείται ελάττωση της λόγω βλάβης των κινητικών ινιδίων και εκφυλιστικών αλλοιώσεων των μιτοχονδρίων, στα οποία φυσιολογικά παράγεται και αποθηκεύεται η ενέργεια για τις ανάγκες του κυττάρου. Η αντίδραση των κυττάρων εξαρτάται από το είδος του κυττάρου, τη δόση, τη διάρκεια και τη συχνότητα της ακτινοβόλησης.

Για παράδειγμα, ένας επίμυς όταν ακτινοβοληθεί με εφάπαξ δόση 6Gy ακτίνων X πεθαίνει σε διάστημα 2 ή 3 ημερών. Αντίθετα, μπορεί να επιβιώσει για μεγάλο χρονικό διάστημα όταν η συνολική δόση κατανεμηθεί σε ημερήσιες δόσεις των 0,5Gy.

10.3. ΙΑΤΡΙΚΕΣ ΕΞΕΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΞΕΤΑΣΕΙΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΙΑΤΡΙΚΗΣ

Σημειώνουμε ότι ο πραγματικός και σημαντικός κίνδυνος προέρχεται κυρίως από τυχαία γεγονότα όπως τα διάφορα πυρηνικά ατυχήματα, ατυχήματα σε πυρηνικούς αντιδραστήρες, διαρροές από πυρηνοκίνητα πλοία και υποβρύχια κλπ., με ανυπολόγιστες επιπτώσεις για την υγεία του πληθυσμού.

Το 2005 οι ιατρικές ακτινοβολίες, στις οποίες εκτίθενται το άτομο αποτελούσαν κατά μέσο όρο το 15%-20% που λάμβανε από τη φυσική ακτινοβόληση, δηλαδή από τις ακτινοβολίες που προέρχονταν από την Γη, τις κοσμικές ακτινοβολίες, ιδιαίτερα του ραδονίου, του νερού, των τροφών κ.α.. Το 2010 το ποσοστό αυτό αυξήθηκε περίπου στο 50% λόγω αυξημένων εκθέσεων του πληθυσμού στην εφαρμογή της ακτινοθεραπείας, στην ακτινοσκόπηση, στην αξονική τομογραφία και λιγότερο στις εξετάσεις πυρηνικής ιατρικής.

Το Εθνικό συμβούλιο Ακτινοπροστασίας και Μετρήσεων των ΗΠΑ ανακοίνωσε ότι από το 1980 ως το 2009 η κατ άτομο του πληθυσμού δόση από ιατρικές απεικονιστικές μεθόδους αυξήθηκε περίπου στο βπλάσιο. Αναφέρθηκε ότι το 22% της αύξησης οφείλονταν στις εξετάσεις αιματικής διάχυσης του μυοκαρδίου και το 28% σε εξετάσεις αξονικής

τομογραφίας. Περισσότερα από 62 εκατομμύρια σπινθηρογραφήματα CT έγιναν το 2007 στις ΗΠΑ ενώ το 1980 είχαν γίνει μόνο 3 εκατομμύρια. Επιπλέον, των συνήθων δόσεων κατά τα τελευταία 60 χρόνια συνέβησαν τουλάχιστον 600 ραδιενεργά ατυχήματα που κατέληξαν σε 200 τουλάχιστο θανάτους. Το ¼ από αυτά οφείλονταν σε ιατρικά ατυχήματα.

Αναφέρθηκε ότι ένα σπινθηρογράφημα CT δίνει περίπου 25 mSv ως και 31 mSv στον εξεταζόμενο. Στις ΗΠΑ γίνονται καθημερινά πάνω από 19500 εξετάσεις CT που αντιστοιχούν σε κάθε εξεταζόμενο σαν να υποβάλλονταν σε 30-442 ακτινογραφίες θώρακα. Αναφέρθηκε ότι μερικοί ασθενείς με κολικό νεφρού υποβλήθηκαν σε πολλαπλές εξετάσεις CT και έλαβαν δόσεις μέχρι 153,7 mSv. Η εξέταση stresstou μυοκαρδίου με $^{201}\text{TlCl}$ δίνει τη μέγιστη εκ των διαγνωστικών δόσεων της πυρηνικής ιατρικής. Για το λόγο αυτό σήμερα αποφεύγεται αυτή η εξέταση. Η Εθνική Ακαδημία Επιστημόνων επί των βιολογικών δράσεων των ιοντιζουσών ακτινοβολιών των ΗΠΑ (BEIRVI) ανέφερε ότι μια ατομική δόση σε άτομα του πληθυσμού των 10 mSv συνδυάζεται με τον κίνδυνο εμφάνισης κατά τη διάρκεια της ζωής ενός καρκίνου ή λευχαιμίας σε 1:1000 άτομα. Παρατηρήθηκε ότι η αξονική τομογραφία-στεφανιαία αγγειογραφία των 16 τομών μειώνει τη δόση ακτινοβολίας που λαμβάνει ο ασθενής σε σχέση με την ίδια ακτινογραφία των 64 τομών από τα 10 ως 25 mSv στο περίπου 1 mSv.

Η χρησιμοποίηση ρφ που εκπέμπουν β-ακτινοβολία, όπως το ^{90}Y -zevalin υπολογίζοντας και την ακτινοβολία bremsstrahlung, δίνουν αρκετή ακτινοβολία στον εξεταζόμενο. Για προστασία χρησιμοποιούμε καλύμματα Perspex (10mm) ή αλουμινίου (5mm) και εξωτερικά μόλυβδο (1mm).

Παραδείγματα εξετάσεων πυρηνικής ιατρικής που δόθηκαν από τον που και που δίνουν ικανή δραστική ισοδύναμη δόση στον εξεταζόμενο που φτάνει το όριο των 30 mSv είναι τα εξής:

- Στατική απεικόνιση εγκεφάλου με 500 MBq υπερτεχνητικού τεχνητίου.
- Απεικόνιση μυοκαρδίου με πύλη με ερυθρά αιμοσφαίρια επισημασμένα με τεχνητίο σε δόση 800MBq.
- Σπινθηρογράφημα οστών με $^{99\text{m}}\text{Tc-MDP}$ σε δόση 550MBq,
- Εξέταση μυοκαρδίου με $^{201}\text{TlCl}$.
- Απεικόνιση αποστημάτων με $^{67}\text{Ga-κίτρικό}$ σε δόση 80MBq.

Η αποκατάσταση βλαβών στους ιστούς από ακτινοβολίες είναι τόσο καλύτερη όσο περισσότερο η δόση δίνεται τμηματικά.

Για τη μείωση της δόσης της εξέτασης της αιματικής διάχυσης του μυοκαρδίου η Αμερικάνικη Εταιρεία Πυρηνικής Καρδιολογίας το 2010 σύστησε να γίνεται η εξέταση με προσοχή και με ειδικές ενδείξεις, να προτιμάται το τεχνητίο από το θάλλιο, να χρησιμοποιούνται νεότερες τεχνολογίες και ανακατασκευή της εικόνας και τέλος, να γίνεται μόνο η εξέταση stressεφόσον αυτό είναι δυνατό. Είναι γνωστό ότι τα αποτελέσματα της ακτινοβόλησης εμφανίζονται από 5-20 χρόνια μετά τη σπινθηρογράφιση.

Το προσωπικό της ομάδας επείγουσας νοσηλείας λαμβάνει από τους ασθενείς που υποβλήθηκαν σε σπινθηρογράφημα αιμάτωσης μυοκαρδίου ή σε εξέταση PET, το περισσότερο 80mSv ενώ οι συνεπιβάτες των εξετασθέντων αυτών εφόσον παρέμειναν σε λεωφορείο 4 ώρες έλαβαν από τους εξετασθέντες το μέγιστο 100mSv την ίδια μέρα της ως άνω εξέτασης.

10.4. ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΎΞΥΠΝΗΣ ΚΑΡΤΑΣ

Το 2004 ο Hans Van Isselt και συνεργάτες και αργότερα, το 2005 οι Φ. Γραμματικός και Η. Sinzinger και συν. σύστησαν την καταγραφή όλων των δόσεων που λαμβάνει δυο ιατρικές εξετάσεις ο καθένας σε ειδική προσωπική κάρτα. Την κάρτα αυτή η Διεθνής Επιτροπή Ατομικής ενέργειας τη θεωρεί πολλαπλώς χρήσιμη, διότι πληροφορεί τον εξεταζόμενο, τους ιατρούς, το περιβάλλον αλλά και δηλώνει στις Αρχές, π.χ. στον έλεγχο που γίνεται στα αεροδρόμια, ποια δόση έχει πάρει ο καθένας που εξετάστηκε με ρφ.

10.5. ΑΚΤΙΝΙΚΗ ΝΟΣΟΣ

Η επίδραση μεγάλων δόσεων ακτινοβολιών από ατυχήματα ή πολεμικές δραστηριότητες έχει πρώιμες και αψώτερες συνέπειες. Στις πρώιμες ανήκει η λεγόμενη ραδιονόσος ή ακτινική νόσος (ΑΝ), μετά από έκθεση σε δόσεις μεγαλύτερες από 1Gy, με ποικίλη συμπτωματολογία. Μέσα σε λίγες ώρες εμφανίζονται ναυτία, εμετός, αιμορραγία από το γαστρεντερικό σύστημα με επακόλουθη αναιμία. Στις αψώτερες συνέπειες ανήκουν η λευχαιμία, ο καρκίνος του πνεύμονα και των οστών, οι βλάβες του μυοκαρδίου, ο καταρράκτης, η στειρότητα και τέλος οι γενετικές βλάβες. Οι τελευταίες γίνονται αντιληπτές και στις επόμενες γενιές. Γενετικές βλάβες μπορούν να προκληθούν ακόμη και μετά από έκθεση σε μικρότερες δόσεις ακτινοβολίας της τάξεως των 0,3-0,8Gy, που είναι η ελάχιστη μεταλλαξιγόνος δόση. Μέχρι το 2000 αναφέρθηκαν πάνω από 417 πυρηνικά ατυχήματα με 127 θανάτους, ενώ κατ' άλλους είναι 580 με 180 θανάτους και ίσως είναι πολύ περισσότερα.

Θα περιγράψουμε τις οξείες και χρόνιες βλάβες που προκαλούνται στον άνθρωπο από την οξεία ΑΝ και τη χρόνια ΑΝ, ώστε να επιβιώσει ένα μεγάλο ποσοστό του ακτινοληθέντος πληθυσμού που χωρίς ιατρική φροντίδα και χωρίς τη γνώση των απαραίτητων προληπτικών μέτρων θα είχε χαθεί.

10.5.1. Τα στάδια της πάθησης

Η νόσος από ακτινοβολίες ή ΑΝ αφορά τη εξωτερική ή εσωτερική μόλυνση του ανθρώπου. Μετά από έκθεση του σε μεγάλες δόσεις ακτινοβολιών από πυρηνικά ατυχήματα, από ενσυνείδητες πράξεις τρομοκρατών εν ειρήνη ή από την για πολεμικούς λόγους χρήση πυρηνικών όπλων ή από ραδιενεργά υλικά, οι ολοσωματικές δόσεις που μπορεί να λάβουμε είναι έστω: α) 1-2 Gy, β) 2-6 Gy, γ) 6-8 Gy και δ) 8-12 Gy. Οι 2 πρώτες από τις δόσεις αυτές προκαλούν Ελαφρά και Μέσης βαρύτητας, θεραπεύσιμη οξεία ΑΝ ενώ οι 2 τελευταίες δόσεις προκαλούν Βαριά, συνήθως μη θεραπεύσιμη και Ακαριαία ΑΝ, μη θεραπεύσιμη, αντίστοιχα.

10.5.2. Συμπτώματα και εργαστηριακές εξετάσεις

Στην Ελαφρά οξεία ΑΝ, τα πρώτα συμπτώματα που εμφανίζονται είναι ναυτία, εμετός, διάρροια, πονοκέφαλος και πυρετός. Είναι χαρακτηριστικό ότι η Ελαφρά και η Μέσης βαρύτητας οξεία ΑΝ έχουν ως στάδιο επώασης για την εμφάνιση των συμπτωμάτων-σημείων του ΓΕΣ, από 6 έως 24 ώρες στις δυο βαρύτερες μορφές το στάδιο επώασης είναι σύντομο από 10 min ως 1h. Στη Μέσης Βαρύτητας και στη Βαριά Νόσο, μετά από ένα στάδιο

επώασης 1-4 εβδομάδων θα εμφανιστούν ζαλάδες, κόπωση, αποπροσανατολισμός, αιματηροί εμετοί, μέλαινα, πτώση τριχών κεφαλής, υπόταση και εγκαύματα-πληγές που φλεγμαίνουν.

10.5.3. Ακαριαία Μορφή θα εμφανίσει τα ως άνω συμπτώματα άμεσα.

Μετά από μήνες ή μετά από λίγα χρόνια ηρεμίας, στις 2 ηπιότερες μορφές μπορεί να εμφανιστούν: λευχαιμία, αναιμία, λευκοπενία ή διάφοροι καρκίνοι. Στην περίπτωση αυτή οι καρκίνοι προέρχονται από βλάβη του DNA των κυττάρων λόγω της ακτινοβολίας.

Στη Βαριά και στην Ακαριαία Μορφή αναμένεται ο θάνατος μέσα σε 2-14 μέρες, με μικρές μόνο εξαιρέσεις για τη Βαριά οξεία ΑΝ. Οι πιο ευαίσθητοι ιστοί του ανθρώπου είναι ο μυελός των οστών, ο μαστός των γυναικών, ο θυρεοειδής και οι σιαλογόνοι αδένες. Υπολογίστηκε ότι αν οι εμετοί εμφανιστούν σε χρόνο μικρότερο των 4 ωρών ή σε χρόνο μικρότερο της 1 ώρας, η ολοσωματική δόση είναι μεγαλύτερη από 3,5Gy και από 6,5Gy αντίστοιχα.

Οι εργαστηριακές εξετάσεις που σε ορισμένες περιπτώσεις είναι καλό να γίνονται ανά δωρο αφορούν γενική αίματος κ.ά.. Από την εμπειρία του πυρηνικού ατυχήματος του Τσέρνομπιλ προκύπτει ότι τα κύρια χρόνια προβλήματα της χρόνιας ΑΝ είναι η ατροφία του δέρματος ή η ίνωση στην περιοχή των εγκαυμάτων και ο καταρράκτης. Η πιθανότητα εμφάνισης καρκίνου μετά από ολοσωματική ακτινοβολία παραμένει δια βίου λόγω της βλάβης του γενετικού υλικού των πασχόντων (στοχαστικό αποτέλεσμα).

10.5.4. Θεραπεία

Θεωρείται ότι η κατάσταση εκείνων που δέχτηκαν ολοσωματικά τις πιο μικρές δόσεις (1-2Gy) ή τις πιο μεγάλες (8-30Gy) δε θα επηρεαστούν σημαντικά από τη θεραπευτική αγωγή. Οι μεν πρώτοι διότι έχουν μικρή πιθανότητα θανάτου 0-5% ενός διμήνου, ενώ οι δεύτεροι διότι έχουν πιθανότητα θανάτου 100% εντός 15 ημερών. Για όσους έλαβαν τις ενδιάμεσες δόσεις των 2-6Gy και 6-8Gy η θεραπεία αυξάνει την επιβίωση τους μέχρι 50%. Είναι όμως δυνατό στις μεσαίες αυτές δόσεις να εμφανιστεί ο θάνατος εντός 4-6 εβδομάδων σε ποσοστό 5% ανεξάρτητα αν οι ασθενείς τεθούν υπό θεραπευτική αγωγή.

Συστήνονται: καθαρισμός δέρματος, περιποίηση πληγών, καθαρά ρούχα και αντιβιοτικά. Αν χρειάζεται δίνεται παρεντερικός: ενυδάτωση, μεταγγίσεις ερυθρών αιμοσφαιρίων ή και αιμοπεταλίων. Δίνεται επίσης ο παράγων ανάπτυξης ή αναγέννησης των πολυμορφοπύρηνων λευκών αιμοσφαιρίων figrastim (Neupogen) 5μg/kg ημερησίως ή pelfil grastim (Neulasta) 6mgεβδομαδιαίως υποδορίως και sargramostin 250 μg/m²ημερησίως. Αν χρειάζεται πλύση στομάχου: υδροξύλιο του αργιλίου ή ανθρακικό μαγνήσιο. Το αργίλιο δεσμεύει το ραδιενεργό στρόντιο. Συμπτωματική αγωγή: καθαρτικά, υποκλυσμοί και παυσίπονα.

10.5.5. Προληπτικά, προφυλακτικά, διατροφικά μέτρα

Σύμφωνα με δική μας μελέτη, ίσως επιτρέπεται να καταναλώνουμε: ελιές, λάδι και ζάχαρη, διότι στη χημική τους σύνθεση δεν είναι πιθανό να προσλάβουν από το μολυσμένο έδαφος τα ραδιενεργά ιώδιο, καίσιο και στρόντιο.

Επίσης, καλό είναι να έχουμε από πριν προμηθευτεί κονσέρβες και διάφορα τρόφιμα και μάλιστα γάλα σε σκόνη ή σε άλλη συσκευασία-μορφή.

Συστήνεται να λαμβάνονται: α) Διαλύματα ή δισκία ιωδιούχου καλίου ή Lugol σε δόση 3 δισκία ή 30 σταγόνες/ημερησίως, εντός 24h από τη ραδιενεργό ρύπανση. β) Διάλυμα Πρωσικού μπλε, το οποίο δεσμεύει τα ραδιενεργά στρόντιο και θάλλιο και μαζί αποβάλλεται με τα κόπρανα. γ) Διάλυμα της «χηλικής» ένωσης διαιθυλ-τριαμινο πενταοξικό οξύ (DTPA) που με χηλικούς δεσμούς, οι οποίοι προσομοιάζουν με «χηλές» δεσμεύει τα ραδιενεργά μέταλλα: αμερίκιο, πλουτόνιο και κιούριο που έχουν πάρα πολύ μεγάλο χρόνο ημιζωής και συναποβάλλεται με τα ούρα.

Συστήνεται επίσης: Να μείνουμε στο σπίτι για κάποιο χρονικό διάστημα, σε κάποιο κεντρικό δωμάτιο, να κλείσουμε πόρτες, παντζούρια και παράθυρα, να έχουμε καλές κουρτίνες, να κλείσουμε αεραγωγούς, κλιματιστικά και την επικοινωνία με φουγάρα, να φέρουμε από νωρίς τα κατοικίδια ζώα μέσα στο σπίτι και να μην επικοινωνούμε άμεσα με όσους βρίσκονται έξω από το σπίτι. Αν πρέπει να μετακινηθούμε εκτός σπιτιού ή σε άλλη πόλη πριν ή μετά το πυρηνικό ατύχημα καλό είναι να έχουμε μαζί μας ένα έτοιμο βαλιτσάκι με: φακό, ραδιόφωνο, μπαταρίες εφεδρικές, κινητό τηλέφωνο, κονσέρβες, νερό, φάρμακα-υλικό πρώτης ανάγκης, ανοιχτήρι κονσερβών, καθαρά ρούχα και χρήματα ή τις απαραίτητες πιστωτικές κάρτες.

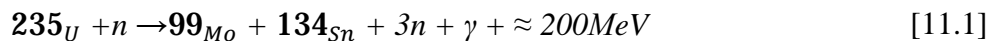
11. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΤΕΧΝΗΤΑ ΡΑΔΙΟΕΝΕΡΓΑ ΝΟΥΚΛΙΔΙΑ

11.1. Η ΣΧΑΣΗ - ΟΙ ΠΥΡΗΝΙΚΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ

Τα τεχνητά ραδιονουκλίδια (ρν) χρησιμοποιούνται τόσο για διαγνωστικές εξετάσεις στην πυρηνική ιατρική όσο και για θεραπευτικούς σκοπούς.

Η σχάση είναι μια από τις διαδικασίες με τις οποίες μπορεί να παραχθούν τεχνητά ρν και συντελείται μέσα σε «θερμικούς» πυρηνικούς αντιδραστήρες όπου το σχάσιμο υλικό είναι ουράνιο-235 (^{235}U) ή πλουτώνιο-239 (^{239}Pu)

Κατά τον βομβαρδισμό του ^{235}U με «θερμικά» νετρόνια δημιουργείται το ασταθές ^{236}U το οποίο ακαριαία υφίσταται σχάση. Το αποτέλεσμα της σχάσης είναι: α) η δημιουργία δύο θραυσμάτων τα οποία δεν έχουν τον ίδιο μαζικό αριθμό. Η αναλογία μεταξύ των μαζικών αριθμών είναι 2:3 όπου για τον «ελαφρύ» πυρήνα ο Α κυμαίνεται από 85 ως 104 ενώ για το «βαρύ» πυρήνα ο Α κυμαίνεται από 130 ως 150, β) η παραγωγή γ ακτινοβολίας, γ) η παραγωγή νετρονίων και δ) παράγεται ένα ποσό ενέργειας $\approx 200 \text{ MeV}$ καθώς η σχάση είναι μια εξώθερμη διαδικασία και το ποσό αυτό αποδίδεται σαν κινητική ενέργεια στα προϊόντα της αντίδρασης. Παράδειγμα μιας διαδικασίας σχάσεως αποτελεί η αντίδραση:



Η παραπάνω αντίδραση γίνεται ακαριαία και ονομάζεται «αλυσωτή». Υπάρχει μια μεγάλη πληθώρα στοιχείων τα οποία μπορούν να δημιουργηθούν από τη διαδικασία της σχάσης με τους μαζικούς τους αριθμούς να κυμαίνονται από 70 μέχρι 160. Τέτοια ρν είναι το καίσιο-137 (^{137}Cs) το οποίο έχει χρόνο ημιζωής περίπου 30,17 έτη, το ^{99}Mo το οποίο έχει χρόνο ημιζωής 66 ώρες, το ^{135}Xe , το ^{141}Ba κ.ά..

Τα νετρόνια τα οποία παράγονται από τη σχάση του ^{235}U είναι ταχέα και πολύ ενεργητικά. Κατά τη διαδικασία της σχάσης, για να μην εμφανισθεί πρόβλημα ενεργοποίησης του ουρανίου από τα ταχέα νετρόνια, μειώνουμε την ενέργεια των νετρονίων επιβραδύνοντας τα τοποθετώντας στον αντιδραστήρα σαν επιβραδυντή ύδωρ, βαρύ ύδωρ ($^2\text{H}_2\text{O}$) ή γραφίτη. Τα νετρόνια που επιβραδύνονται ονομάζονται θερμικά νετρόνια.

Αυτά τα θερμικά νετρόνια μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να προκαλέσουν και άλλες σχάσεις με άλλους πυρήνες, γι αυτό και η όλη διαδικασία ονομάζεται «αλυσωτή». Για να ρυθμίσουμε το ρυθμό με τον οποίο τα θερμικά νετρόνια προκαλούν σχάσεις, εντός του κεντρικού πυρήνα του πυρηνικού αντιδραστήρα (καρδιά του αντιδραστήρα) τοποθετούμε ράβδους κατασκευασμένους από βόριο (B) ή κάδμιο (Cd) ανάμεσα στις ράβδους καυσίμου που περιέχουν το ^{235}U , για να απορροφήσουν αυτά τα νετρόνια. Όσες περισσότερες ράβδους τοποθετήσουμε τόσο περισσότερο επιβραδύνουμε την αλυσωτή αντίδραση.

Το ^{239}Pu αποτελεί το σχάσιμο υλικό για τους «ταχείς» πυρηνικούς αντιδραστήρες. Το ^{239}Pu παράγεται από την ενεργοποίηση του ^{238}U με χρόνο ημιζωής τα 23min το οποίο μεταστοιχειώνεται σε νεπτόνιο-239 (^{239}Np) το οποίο έχει χρόνο ημιζωής 2,4 ημέρες. Αυτό με τη σειρά του μεταστοιχειώνεται στο ^{239}Pu και στις δύο παραπάνω μεταστοιχειώσεις έχουμε την εκπομπή β^- ακτινοβολίας.

Γύρω από την καρδιά του αντιδραστήρα υπάρχει ο ανακλαστής, συνήθως κατασκευασμένος από βόριο και χάλυβα, με σκοπό την ανάκλαση πίσω σ αυτό νετρονίων που διαφεύγουν από την καρδιά.

Τέλος, τα παραπάνω συστήματα θωρακίζονται με σκυρόδεμα πάχους τουλάχιστον ενός μέτρου και επενδυμένο εσωτερικά με στεγανό χαλύβδινο έλασμα. Η θωράκιση σχεδιάζεται και κατασκευάζεται έτσι, ώστε να αντέχει τις αναμενόμενες μεγάλες πιέσεις και να εγκλωβίζει εντός αυτού τα ραδιενεργά προϊόντα, ώστε στην περίπτωση ατυχήματος να μην επιτρέψει τη διαρροή τους στο περιβάλλον.

11.2. ΒΟΜΒΑΡΔΙΣΜΟΣ ΑΠΟ ΝΕΤΡΟΝΙΑ

Μέσα στον πυρηνικό αντιδραστήρα λαμβάνει χώρα και ο βομβαρδισμός σταθερών πυρήνων από νετρόνια καθιστώντας τους ραδιενεργούς (τεχνητά ρν). Τα παραγόμενα ισότοπα από αυτή τη διαδικασία ανήκουν στην ίδια χημική ομάδα με τους αρχικούς σταθερούς πυρήνες. Υπάρχει, βέβαια, και η δυνατότητα ενεργοποίησης σταθερών πυρήνων και με άλλα σωματία (πρωτόνια, σωματία α) από τα οποία προκύπτουν ισότοπα διαφορετικής ομάδας από τους μητρικούς πυρήνες.

Ο βομβαρδισμός με νετρόνια παρουσιάζει ένα σοβαρό πρόβλημα. Οι αρχικοί πυρήνες δεν μεταστοιχειώνονται ολοκληρωτικά με αποτέλεσμα στα παραγόμενα ισότοπα να εμπεριέχονται φορείς του αρχικού στοιχείου («ακαθαρσίες») καθιστώντας την απομάκρυνση τους δύσκολη και δαπανηρή διαδικασία και η οποία οδηγεί στο υψηλό κόστος των παραγόμενων ισωτόπων. Εκτός αυτού, τα παραγόμενα ισότοπα έχουν χαμηλή ειδική ενεργότητα (specificactivity) γεγονός που οδηγεί στην προτίμηση άλλων μεθόδων (σχάση, κύκλοτρο, γεννήτριες) για την παραγωγή τους.

11.3. ΟΙ ΓΡΑΜΜΙΚΟΙ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΕΣ

Οι γραμμικοί επιταχυντές για να μπορούν να επιτύχουν υψηλές ενέργειες σωματιδίων, το μήκος και επομένως και το μέγεθος του όλου συστήματος πρέπει να αυξάνεται υπερβολικά. Για να μειώσουμε το μέγεθος του επιταχυντή, οδηγούμε τα σωματίδια σε μια κυκλική διαδρομή, έτσι χρησιμοποιούμε την ίδια επιταχυντική μονάδα πολλές φορές και ο επιταχυντής έχει πιο μικρό μέγεθος.

11.4. ΤΟ ΚΥΚΛΟΤΡΟΝΙΟ

Το πρώτο κυκλοτρόνιο κατασκευάστηκε το 1932 από τους E.O. Lawrence και Livinston με μέγιστη ενέργεια 1.2MeV. Μπορούμε να επιταχύνουμε φορτισμένα σωματία, ώστε να αποκτήσουν πολύ υψηλές ενέργειες και στη συνέχεια να τα χρησιμοποιήσουμε για το βομβαρδισμό σταθερών πυρήνων. Τα σωματία που χρησιμοποιούμε είναι πρωτόνια (p), δευτερόνια (d), τριτόνια (t) ακόμα και σωματία α.

Το κυκλοτρόνιο βρίσκεται μέσα σε κενό το οποίο περιέχει και τα ημικυκλικά ηλεκτρόδια που έχουν σχήμα D και χρησιμοποιούνται για την επιτάχυνση των φορτισμένων σωματιδίων. Μια εναλλασσόμενη τάση, η οποία παράγεται με τη βοήθεια γεννήτριας,

εφαρμόζεται στα άκρα αυτών των ηλεκτροδίων, υπεύθυνη για την επιτάχυνση των σωματιδίων.

Τα πιο γνωστά ρν τα οποία παράγονται με τη χρήση κυκλοτρονίου είναι: το ^{123}I , ^{111}In , ^{201}Tl , ^{67}Ga , τα οποία χρησιμοποιούνται στην απεικόνιση PET. Τα κυκλοτρόνια, ανάλογα με την ενέργεια που αποκτούν τα επιταχυνόμενα φορτισμένα σωματίδια, χωρίζονται σε 3 κατηγορίες: α) Μικρής ενέργειας (από 9 μέχρι 11MeV) τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του ^{18}F , β) Μεσαίας ενέργειας (15MeV) για την παραγωγή ^{15}O , ^{11}C , ^{13}N και γ) Μεγάλης ενέργειας (30MeV) για την παραγωγή των ^{123}I , ^{201}Tl κ.ά..

11.5. ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

11.5.1. Γεννήτρια $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$

Μερικά από τα ραδιοφάρμακα (ρφ) που χρησιμοποιούνται στις εξετάσεις της Πυρηνικής Ιατρικής έχουν μικρό φυσικό χρόνο υποδιπλασιασμού περιορισμός που αναγκάζει την καθημερινή τους βιομηχανική Παρασκευή και διάθεση αναποτελεσματική και δαπανηρή.

Το ευρύτετα χρησιμοποιούμενο ρν είναι το ^{99m}Tc . Για την παραγωγή του, χρησιμοποιείται η πιο ευρέως διαδεδομένη γεννήτρια $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$. Το ^{99}Mo έχει χρόνο ημιζωής 66 ώρες και εξασθενεί με εκπομπή ακτινοβολίας β^- κατά 87% μεταπίπτοντας στο ασταθές ^{99m}Tc και το υπόλοιπο 13% μεταπίπτοντας στο σταθερό ^{99}Tc το οποίο έχει χρόνο ημιζωής $2,1 \times 10^{-5}$ χρόνια. Επίσης το ^{99}Mo εκπέμπει γ ακτινοβολία με ενέργειες 740 keV και 780 keV. Στις σύγχρονες γεννήτριες χρησιμοποιείται το Mo^{99} που παράγεται από τη διαδικασία της σχάσης του ^{235}U και παραλαμβάνεται με τη μορφή του μολυβδικού αμμωνίου $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4^-$.

Η γεννήτρια $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ περιέχει τους μητρικούς και θυγατρικούς πυρήνες οι οποίοι βρίσκονται σε ραδιενεργό (μόνιμη) ισορροπία. Αυτό σημαίνει πως οι θυγατρικοί πυρήνες (^{99m}Tc) ακολουθούν το ρυθμό διάσπασης των μητρικών (^{99}Mo). Αυτοί οι πυρήνες βρίσκονται στο πάνω μέρος μιας γυάλινης ή πλαστικής στήλης η οποία περιέχει τριοξείδιο του αργιλίου ή «αλουμινία» (Al_2O_3), σε ποσότητα 5 με 10 gr ανάλογα με την ποσότητα του ^{99}Mo , και χαρακτηρίζεται ως «υλικό ανταλλαγής». Το ^{99m}Tc παραλαμβάνεται από τη γεννήτρια μέσω της διαδικασίας της «έκλυσης». Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, διάλυμα NaCl 0,9% περνάει μέσα από την στήλη συμπαρασύροντας τους ραδιενεργούς πυρήνες. Το ^{99}Mo κατακρατείται από την αλουμινία με τη χημική μορφή MoO_4^{-2} ενώ το ^{99m}Tc παραλαμβάνεται στο τελικό έκλυμα με τη μορφή του υπερτεχνητικού ιόντος ($^{99m}\text{TcO}_4^-$) το οποίο είναι +7σθένες. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το ^{99}Mo που χρησιμοποιείται είναι προϊόν σχάσης. Σε αυτή την περίπτωση το παραγόμενο ^{99m}Tc έχει μεγαλύτερη ειδική ενεργότητα από ότι εάν χρησιμοποιούσαμε ^{99}Mo το οποίο θα ήταν προϊόν ακτινοβόλησης του με νετρόνια ενώ και οι στήλες και οι όγκοι έκλυσης είναι μικρότεροι πράγμα που βοηθά στην Παρασκευή ρφ σε μικρούς όγκους. Μειονέκτημα αποτελεί η παρουσία προσμίξεων της στήλης στο τελικό έκλυμα.

Αφού γίνει η έκλυση, το παραγόμενο ^{99m}Tc ακολουθεί το δικό του ρυθμό διάσπασης ενώ το ^{99}Mo που βρίσκεται μέσα στη γεννήτρια εξακολουθεί να εξασθενεί παράγοντας νέους πυρήνες ^{99m}Tc που ακολουθούν το δικό τους ρυθμό διάσπασης μέχρι την επόμενη έκλυση. Σε κάθε έκλυση λαμβάνεται το 70% με 90% του υπάρχοντος στη γεννήτρια ^{99m}Tc . Η μέγιστη ποσότητα ^{99m}Tc που μπορεί να παραληφθεί μέσω έκλυσης

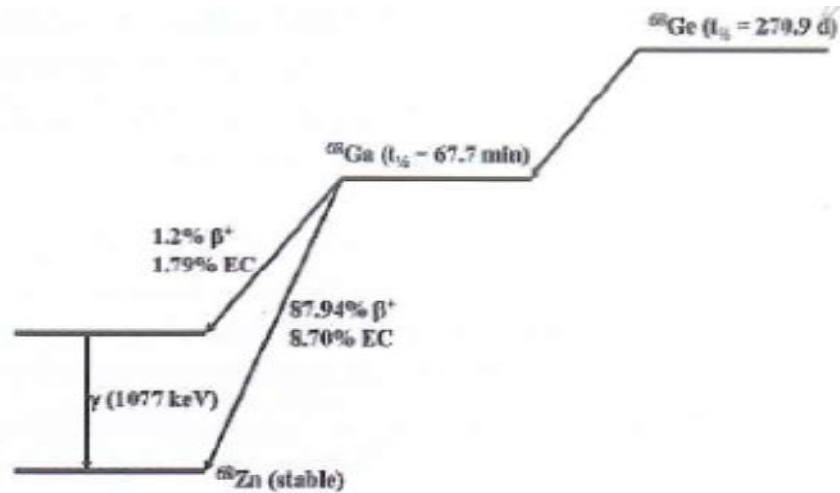
γίνεται μετά από 23 ώρες παρ όλα αυτά μετά από 6 ώρες από την 1^{n} έκλυση μπορεί να ληφθεί περίπου το 60%. Στο τελικό προϊόν της έκλυσης είναι δυνατόν να υπάρχει μια ποσότητα Al^{+3} και αυτό λόγω της ραδιόλυσης της αλουμίνας. Το όριο της ποσότητας Al^{+3} στο τελικό έκλυμα είναι $10\mu\text{g/mL}$. Η παρουσία Al^{+3} μπορεί να εντοπισθεί με τη βοήθεια της χρωματογραφίας. Επίσης στο τελικό προϊόν είναι δυνατόν να υπάρχει και ποσότητα ^{99}Mo κάτι που υποβαθμίζει τη ραδιοχημική καθαρότητα του προϊόντος. Το όριο που έχει τεθεί για την ποσότητα ^{99}Mo στο προϊόν της έκλυσης είναι $0.15\ \mu\text{Ci}$ (5.55kBq) για κάθε 1mCi (37MBq) $^{99\text{m}}\text{Tc}$ χορηγούμενης δόσης στον ασθενή. Ένα απλό τεστ που μπορεί να καταδείξει την παρουσία ^{99}Mo είναι το τεστ της μητρικής διέλευσης (parent breakthrough). Σύμφωνα με αυτό το τεστ, μπορούμε να εισάγουμε το φιαλίδιο του ελκώματος μέσα σε μια μολύβδινη θωράκιση, πάχους περίπου 6mm , ικανή να αποκόψει τα φωτόνια του $^{99\text{m}}\text{Tc}$ που έχουν ενέργεια $140\ \text{keV}$ αλλά όχι και τα φωτόνια του ^{99}Mo που έχουν ενέργειες 740 και 778keV . Στη συνέχεια τοποθετούμε το φιαλίδιο με τη θωράκιση μέσα σένα βαθμονομητή ενεργότητας και επιλέγοντας το κανάλι που αντιστοιχεί στις ενέργειες του ^{99}Mo παρατηρούμε την παρουσία του στο τελικό προϊόν. Επίσης, ένα άλλο τεστ είναι η φασματοσκοπική ανάλυση με τη βοήθεια ενός αναλυτή πολλαπλών καναλιών.

11.5.2. Η γεννήτρια $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$

Το ^{68}Ga εκπέμπει β^+ ακτινοβολία ενέργειας $1,92\ \text{MeV}$ σε αφθονία 89% (in 89% abundance), συνοδευόμενη από εκπομπή γάμμα ακτινοβολίας ενέργειας $1,08\text{MeV}$ και καταλήγει στο σταθερό ψευδάργυρο-68 (^{68}Zn). Έχει χρόνο ημιζωής τα $67,7$ λεπτά. Το ^{68}Ga αποτελεί εξαιρετικό ρν για την απεικόνιση με τη χρήση PET κάμερα μια και ο χρόνος ημιζωής του όσο και η εκπομπή β^+ ακτινοβολίας, διατηρούν τη χορηγούμενη δόση στον ασθενή σε αποδεκτά επίπεδα. Επιπλέον είναι ένα ρν ίδιο «ευπροσάρμοστο» με το ^{18}F . Τα πιο γνωστά ρφ με ^{68}Ga είναι το ^{68}Ga -dota-d-phe1-tyr3-octreotide (^{68}Ga -dotatoc) το οποίο χρησιμοποιείται για την απεικόνιση των νευροενδοκρινών όγκων, επίσης το macro aggregate albumin (MAA), το ^{68}Ga citrate και το ^{68}Ga ethylenediamine – tetra – acetic acid (EDTA).

Το ^{68}Ge έχει χρόνο ημιζωής τις 271 ημέρες και εξασθενεί μέσω ηλεκτρονικής σύλληψης δίνοντας το ^{68}Ga . Παράγεται σε μικρό κυκλοτρόνιο χρησιμοποιώντας διάφορα στοιχεία όπως ^{68}Ga και ^{66}Zn σαν στόχο σε διάφορα σχήματα όπως επίσης χρησιμοποιώντας και διαφορετικά σωματίδια για τις συγκρούσεις επί αυτών.

Η γεννήτρια $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ αποτελεί την «πηγή» από την οποία μπορούμε να παράγουμε άμεσα το ^{68}Ga για τις εξετάσεις PET ενός τμήματος Πυρηνικής Ιατρικής ακόμη και αν σε αυτό δεν είναι εγκατεστημένο κάποιο κύκλοτρο. Μετά από πολλές δεκαετίες ερευνών και για διάφορους τύπους γεννητριών που έχουν αναπτυχθεί, στις μέρες μας, η γεννήτρια $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ περιέχει μια πλαστική ή υάλινη στήλη μέσα στην οποία υπάρχει διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2) ή διοξείδιο του κασσιτέρου (SnO_2), ως υλικό που θα κατακρατήσει τους πυρήνες ^{68}Ge . Η έκλυση γίνεται από όγκο 5mL HCl ($0.1-1$) Νόπου στο τελικό έκλυμα το ^{68}Ga βρίσκεται με τη μορφή του 3σθενούς κατιόντος ($^{68}\text{Ga}^{+3}$). Η απόδοση της έκλυσης, για καινούρια γεννήτρια, κυμαίνεται από $70\%-80\%$ και πέφτει με το πέρασμα του χρόνου. Τα ποσοστά της μητρικής διέλευσης του ^{68}Ge στο τελικό προϊόν κυμαίνεται από $0,01$ έως $0,001\%$, για καινούργιες γεννήτριες, και αυξάνεται ανάλογα με τη συχνή χρήση της γεννήτριας.



Σχήμα 17: Απλουστευμένο σχήμα έκπτωσης του ^{68}Ge .

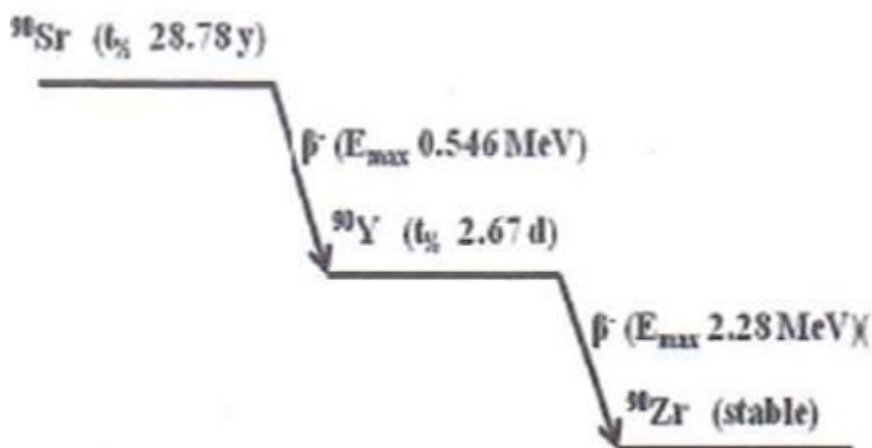
11.5.3. Η γεννήτρια $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$

Η λειτουργία της γεννήτριας $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ βασίζεται στη μόνιμη ισορροπία (secular equilibrium) των μητρικών πυρήνων ^{90}Sr , οι οποίοι εξασθενούν δίνοντας σαν θυγατρικό προϊόν ^{90}Y υψηλής ειδικής ενεργότητας. Το ^{90}Sr έχει χρόνο ημιζωής τα 28,8 χρόνια και η παγκόσμια παραγωγή του είναι πολύ μεγάλη καθιστώντας το αστείρευτη πηγή παραγωγής υτρίου.

Το ^{90}Y έχει χρόνο ημιζωής τις 64.1 ώρες και εξασθενεί στο σταθερό ζιρκόνιο (^{90}Zr). Εκπέμπει β^- ακτινοβολία ενέργειας 2,28 MeV ενώ δεν εκπέμπει γ -ακτινοβολία. Η β^- ακτινοβολία που εκπέμπει το ^{90}Y , όταν απορροφηθεί από ένα βιολογικό ιστό, εναποθέτει περίπου το 95% της ενέργειας της σε μια εμβέλεια περίπου 6mm γύρω από το σημείο απορρόφησης. Γι αυτό το λόγο και χρησιμοποιείται σε θεραπευτικές εφαρμογές όπως τα non-Hodgkin's λεμφώματα, για ραδιομενόλυση και για καταστροφή ηπατικών μεταστάσεων.

Το ^{90}Y παρασκευάζεται με δύο διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος είναι ο βομβαρδισμός του σταθερού ^{89}Y με νετρόνια σε πυρηνικό αντιδραστήρα, όμως σε αυτήν την περίπτωση το ^{90}Y που παράγεται είναι χαμηλής ειδικής ενεργότητας αλλά υψηλής ραδιοχημικής καθαρότητας και ο δεύτερος είναι με τη χρήση της γεννήτριας $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$.

Τα τελευταία χρόνια έχουν προταθεί και έχουν κατασκευαστεί τέσσερις διαφορετικοί τύποι γεννητριών: α) η γεννήτρια ανταλλαγής ιόντων (ion exchange based generator), β) η singlestage supported liquid membrane (SLM) based generator. γ) η twostage SLM based generator και δ) η ηλεκτροχημική γεννήτρια (electrochemical generator). Η καλύτερη εξ αυτών είναι η ηλεκτροχημική γεννήτρια μιας και δίνει απόδοση παραγωγής 97% - 98% του υπάρχοντος σε αυτήν ^{90}Y . Επίσης, εξαιτίας των διαφορετικών χρόνων ημιζωής των pH που περιέχει, μπορεί να παράγει ^{90}Y υψηλής ραδιοχημικής καθαρότητας και υψηλής ειδικής ενεργότητας. Μειονέκτημα αποτελεί η διαχείριση και η αποθήκευση της γεννήτριας εξαιτίας του μεγάλου χρόνου ημιζωής του ^{90}Sr .



Σχήμα 18: Απλουστευμένη σχήμα έκπτωσης του ^{90}Sr .

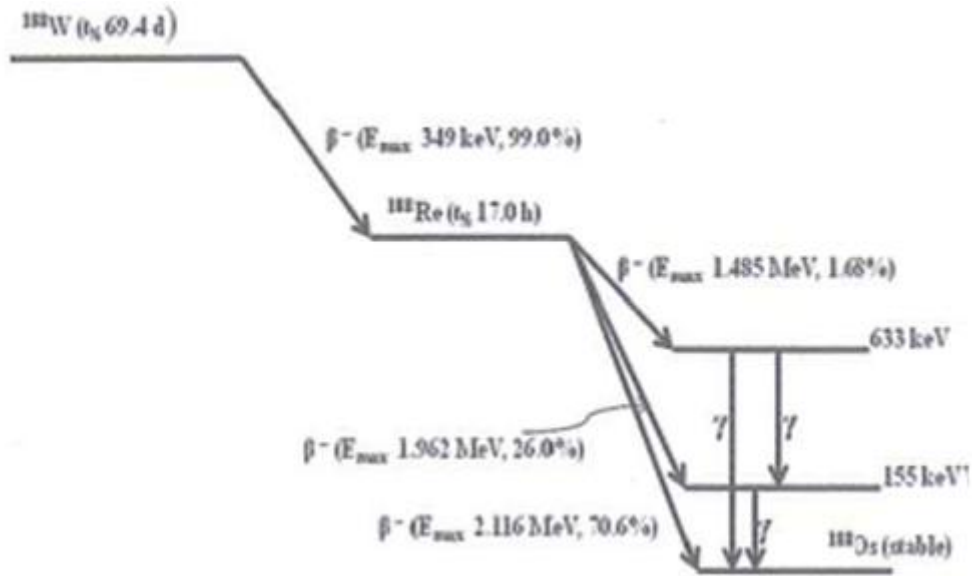
11.5.4. Η γεννήτρια $^{188}\text{W}/^{188}\text{Re}$

Τορήνιο-188 (^{188}Re) έχει χρόνο ημιζωής τις 16,9 ώρες, εκπέμπει β^- ακτινοβολία με ενέργειες 2,12 MeV (71,1%) και 1,965 MeV (25,6%) και γ ακτινοβολία με ενέργεια 155keV. Το ^{188}Re παράγεται με δυο τρόπους. Ο πρώτος είναι ο βομβαρδισμός του ^{187}Re με νετρόνια, σε πυρηνικό αντιδραστήρα, όπου το παραγόμενο ^{188}Re μεταπίπτει στο σταθερό όσμιο-188. Ο δεύτερος είναι από την εξασθένηση του βολφραμίου 188 (^{188}W). Αυτή η διαδικασία βρίσκει εφαρμογές στις γεννήτριες $^{188}\text{W}/^{188}\text{Re}$ μιας και ικανοποιεί την απαίτηση για μεγάλης διάρκειας ημιζωής μητρικούς πυρήνες, εύκολη διαχείριση και μεταφορά της γεννήτριας καθώς και υψηλής ειδικής ενεργότητας προϊόν ελκούσης. Το ^{188}W έχει χρόνο ημιζωής 69,4 ημέρες.

Το ^{188}Re χάρις των ιδιοτήτων που έχει, αποτελεί ένα ρν κατάλληλο για θεραπευτικές εφαρμογές στην Πυρηνική Ιατρική. Έχει την ίδια χημική συμπεριφορά με το ^{99}Tc . Μπορεί να συνδέεται με αντισώματα, πεπτίδια, lipiodol ή DMSA. Χρησιμοποιείται για την ανακούφιση από οστικές μεταστάσεις όπως επίσης και για την θεραπεία όγκων στο ήπαρ και στα non-Hodgkin' σλεμφώματα.

11.5.5. Η γεννήτρια $^{113}\text{Sn}/^{113}\text{mIn}$

Η γεννήτρια $^{113}\text{Sn}-^{113}\text{mIn}$ χρησιμοποιούνταν κυρίως τις δεκαετίες του 1960 και 1970 για την Παρασκευή των ρφ επισημασμένων με ^{113}mIn τα οποία χρησιμοποιούνταν για την απεικόνιση ήπατος, νεφρών και εγκεφάλου. Το ^{113}Sn έχει χρόνο ημιζωής 117 ημέρες και εξασθενεί μέσω ηλεκτρονικής σύλληψης ενώ το θυγατρικό στοιχείο που προκύπτει, το ^{113}mIn , έχει χρόνο ημιζωής 1,65 ώρες και εξασθενεί στο σταθερό ^{113}In μέσω ισομερούς μετάπτωσης εκπέμποντας γ ακτινοβολία ενέργειας 392keV. Το ^{113}Sn παράγεται από το σταθερό ^{112}Sn μέσω ενεργοποίησης αυτού με νετρόνια όπως επίσης μπορεί να παρασκευαστεί και σε κυκλοτρόνιο. Η γεννήτρια περιέχει μια ένυδρη στήλη οξειδίου του ζirkονίου (hydrous zirconium oxide column) όπου κατά την έκλυση με υδροχλωρικό οξύ 0,05M, το ^{113}Sn απορροφάται από αυτή και το ^{113}mIn εκλύεται με τη μορφή $^{113}\text{mInCl}_3$.



Σχήμα 19: Απλουστευμένο σχήμα έκπτωσης του ^{188}W .

11.5.6. Η γεννήτρια $^{82}\text{Sr}/^{82}\text{Rb}$

Το στρόντιο-82 (^{82}Sr) έχει χρόνο ημιζωής τις 25 ημέρες και εξασθενεί μέσω ηλεκτρονικής σύλληψης στο θυγατρικό Ρουβίδιο-82 (^{82}Rb). Το ^{82}Rb έχει χρόνο ημιζωής τα 75 sec και εξασθενεί εκπέμποντας β^+ ακτινοβολία.

Η γεννήτρια $^{82}\text{Sr}/^{82}\text{Rb}$ περιέχει μια στήλη διοξειδίου του κασσιτέρου, μέσα στην οποία βρίσκεται το ^{82}Sr και εκλύεται με 0,9% NaCl όπου το τελικό έκλυμα έχει τη χημική μορφή $^{82}\text{RbCl}$. Η έκλυση μπορεί να επαναλαμβάνεται κάθε 15min χάρη στο μικρό χρόνο ημιζωής του ^{82}Rb . Εξαιτίας αυτού του χρόνου, το ^{82}Rb χορηγείται άμεσα στον ασθενή για την PETαπεικόνιση του μυοκαρδίου. Η γεννήτρια $^{82}\text{Sr}/^{82}\text{Rb}$ είναι γνωστή με την εμπορική ονομασία «Cardiogen». Η γεννήτρια περιέχει 90 με 150 mCi ^{82}Sr ενώ η χορηγούμενη δόση ^{82}Rb σε έναν ασθενή 70 kg δεν πρέπει να ξεπερνά τα 2220MBq (60mCi) και η αθροιστικά χορηγούμενη, τα 4440MBq (120mCi).

12. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΡΑΔΙΟΦΑΡΜΑΚΑ

12.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ραδιοφάρμακα (ρφ) ονομάζονται οι ουσίες οι οποίες περιέχουν στο μόριο τους ραδιενεργό ισότοπο και χρησιμοποιούνται τόσο στη διάγνωση όσο και στη θεραπεία διαφόρων παθήσεων. Παράλληλα και κατ' επέκταση του όρου ραδιοφάρμακα, η σήμανση με ραδιενεργά νουκλίδια ουσιών που μελετώνται ως υποψήφια φάρμακα καθώς επίσης και η ανάλογη σήμανση εν χρήσει φαρμάκων για τη μελέτη κυτταρικών μοριακών στόχων αποτελούν πολύτιμα εργαλεία της φαρμακολογικής έρευνας.

Προϋποθέσεις που πρέπει να πληροί ένα ρφ ποικίλουν ανάλογα με το σκοπό για τον οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί.

Γενικός όμως κανόνας είναι ότι ένα ρφ θα πρέπει να έχει τόση ημιδιάρκεια ζωής όση χρειάζεται για το σκοπό για τον οποίο χρησιμοποιείται. Ο στόχος είναι να περιορίζεται ο χρόνος παραμονής στο σώμα του ασθενούς στο βαθμό που αυτό είναι επιθυμητό και όχι το ρφ αυτό να αποτελεί άνευ λόγου μια παρατεταμένη πηγή ραδιενεργού μόλυνσης.

Ειδικότερα, όταν το ρφ αυτό χρησιμοποιείται για διαγνωστικούς σκοπούς θα πρέπει να παρασκευάζεται εύκολα, να είναι καλά αποστειρωμένο, να έχει ωφέλιμο εύρος ενέργειας και να μην εκπέμπει επιβλαβείς και ανεπιθύμητες ακτινοβολίες.

12.2. ΡΑΔΙΟΦΑΡΜΑΚΑ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΑ

Ο γενικός όρος «ραδιοφάρμακα» παραπέμπει σε διαγνωστικό ή θεραπευτικό ή ερευνητικό σκοπό.

Όσον αφορά τη φαρμακολογική έρευνα, η σήμανση με ραδιενεργά νουκλίδια ουσιών που μελετώνται ως υποψήφια φάρμακα είναι ιδιαίτερα πολύτιμη για τη μελέτη των κινητικών τους παραμέτρων. Οι μέθοδοι αυτοί χρησιμοποιούνται και ερευνητικώς κατά τα στάδια που προηγούνται των κλινικών δοκιμασιών και αφορούν κυρίως τη μελέτη φαρμακοκινητικών παραμέτρων υποψηφίων φαρμάκων στα πειραματόζωα.

Επίσης, η σήμανση με ραδιενεργά νουκλίδια φαρμάκων που δρουν ως αγωνιστές ή ανταγωνιστές στο επίπεδο των υποδοχέων ή των ενδοκυττάρων μορίων βοηθά στην καλύτερη κατανόηση των πολύπλοκων μηχανισμών που σχετίζονται με τη δράση των φαρμάκων αυτών. Τεχνικές όπως το σπινθηρογράφημα και η τοπογραφική κάμερα εκπομπής ποζιτρονίων-positron emission tomography (PET) με τη χρησιμοποίηση επισημασμένων με ραδιενεργά νουκλίδια φαρμάκων δίνουν τη δυνατότητα μελέτης των υποδοχέων ενδογενών ουσιών αλλά και της δράσης στα σημεία αυτά φαρμάκων αγωνιστών ή ανταγωνιστών των υποδοχέων αυτών.

12.3. ΡΑΔΙΟΦΑΡΜΑΚΑ ΚΑΙ ΔΙΑΓΝΩΣΗ

Όταν τα ρφ χρησιμοποιούνται για να βοηθήσουν στη διάγνωση, τότε η ποσότητα που χορηγείται στον ασθενή εξαρτάται από το είδος της εξέτασης, διαφοροποιείται ανάλογα με τον ασθενή, πλην όμως είναι μικρή και σχετικά αβλαβής. Οι μελέτες αυτές μπορεί να είναι στατικές ή δυναμικές, ίννινο ή και μη απεικονιστικές.

Στις περιπτώσεις που το ρφ χρησιμοποιείται διαγνωστικά, τότε ανάλογα με το είδος και τον τρόπο με τον οποίο χορηγείται, το ρφ αυτό διέρχεται από το όργανο στόχο ή συγκεντρώνεται επαρκώς στο στόχο. Στη συνέχεια, η εκπεμπόμενη ακτινοβολία ανιχνεύεται και μετατρέπεται σε εικόνα ή σε αριθμό κρούσεων από ειδικά όργανα. Το επιτυγχανόμενο αποτέλεσμα επιτρέπει στον εξεταστή να μελετήσει τη λειτουργία του συγκεκριμένου οργάνου ή ν' ανιχνεύσει την ύπαρξη πιθανών όγκων ή άλλων μορφωμάτων.

Με τον όρο «γυμνά» ρφ (nakedra diopharma ceuticals) γίνεται αναφορά σε κάθε ραδιενεργό νουκλίδιο που χρησιμοποιείται ως χημική ένωση στην κλινική έρευνα ή πράξη και δεν είναι συνδεδεμένο με ένα χημικό ή βιολογικό μεταφορέα. Κατά κανόνα, το είδος των ραδιενεργών αυτών νουκλιδίων παρουσιάζει χημική ή φυσική συγγένεια προς ένα συγκεκριμένο ιστό, π.χ. το ONaI_3 ως νατριοϊωδίδιο που χρησιμοποιείται για τη μελέτη της λειτουργίας του θυρεοειδή αδένου.

12.4. ΦΑΡΜΑΚΟΚΙΝΗΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΦΑΡΜΑΚΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Τα ρφ μπορούν να δοθούν στον ασθενή ανάλογα είτε από του στόματος είτε παρεντερικά. Ο σχεδιασμός των ρφ αποσκοπεί στο να τα καταστήσει ικανά να προσεγγίζουν και να προσληφθούν από το όργανο στόχο. Χρησιμοποιούνται διάφοροι μέθοδοι όπως η χρησιμοποίηση στοιχείων που φιλούν συγκεκριμένους ιστούς, οι αντιδράσεις αντιγόνου-αντισώματος στην επιφάνεια των κυττάρων στόχων, η φυσική παγίδευση των μικρομορίων του ρφ, η πρόσδεση του σε υποδοχείς των κυττάρων στόχων, η κατάλληλη χημική δομή ώστε να διέρχεται την κυτταρική μεμβράνη, η συγγένεια με ειδικές πρωτεΐνες-φορείς που θα το μεταφέρουν επί τα εντός του κυττάρου, η ικανότητα πρόσδεσης του σε κυτταρικό μοριακό στοιχείο και η δυνατότητα φαγοκυττάρωσης του από κύτταρα όπως τα Kupffer του ήπατος. Ο πυρηνικός ιατρός θα πρέπει να έχει γνώσεις βιοχημείας, φυσιολογίας, μοριακής βιολογίας και να γνωρίζει τη φαρμακοκινητική των ουσιών αυτών καθώς και τους μηχανισμούς της ιστικής συγκέντρωσης των ιδίων ουσιών κάτω από φυσιολογικές και παθολογικές συνθήκες.

Βασική προϋπόθεση για τη χορήγηση ενός ρφ αποτελεί η γνώση ότι το φάρμακο αυτό παρουσιάζει μια αυξημένη εκλεκτικότητά προς το υπό εξέταση όργανο και ότι η συγκέντρωση του στο όργανο αυτό θα φθάσει σε εύλογο χρονικό διάστημα σε ικανοποιητικά για τη συγκεκριμένη μελέτη επίπεδα.

12.5. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΦΥΛΑΞΕΙΣ

Πριν από την απόφαση να χορηγηθεί ένα ρφ για διαγνωστικούς σκοπούς θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψη ορισμένες παράμετροι.

12.6. ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΑ-ΡΑΔΙΟΦΑΡΜΑΚΑ-ΙΧΝΗΘΕΤΕΣ

Ο πρώτος παράγοντας είναι ο κίνδυνος εμφάνισης μιας αλλεργικής αντίδρασης. Αυτό μπορεί να συμβεί κυρίως με ρφ τα οποία περιέχουν στο μόριο τους λευκωματίνη όπως είναι διάφορα σκευάσματα του τεχνητίου-99. Στις περιπτώσεις αυτές, θα πρέπει να ερωτηθεί ο ασθενής εάν έχει ιστορικό αλλεργικών αντιδράσεων και σε ποιες ουσίες έχει εμφανιστεί αυτό. Εφ' όσον κριθεί σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί ένα ανάλογο σκευάσμα, θα πρέπει ο ιατρός ο οποίος κάνει την εξέταση να είναι προετοιμασμένος ν' αντιμετωπίσει κάθε αλλεργική αντίδραση που θα παρουσιαστεί.

Ένας δεύτερος παράγοντας είναι ο κίνδυνος αλληλεπιδράσεων με άλλα φάρμακα ή τροφές, τα οποία λαμβάνει ο ασθενής και τα οποία μπορεί να επηρεάσουν το αποτέλεσμα της δοκιμασίας. Φάρμακα που περιέχουν ιώδιο στα οποία επίσης συμπεριλαμβάνονται πολυβιταμινούχα σκευάσματα και σιρόπια για τον βήχα ή η λήψη μεγάλων ποσοτήτων τροφών που περιέχουν ιώδιο όπως ιοντισμένο άλας, θαλασσινές τροφές και ορισμένα λαχανικά μπορεί να επηρεάσουν τ' αποτελέσματα εξετάσεων του θυρεοειδή αδένος για τα οποία έχει χορηγηθεί ρφ που περιέχει ιώδιο. Προβλήματα επίσης μπορεί να δημιουργήσει και προ ηγηθείσα ακτινολογική εξέταση για την οποία χρησιμοποιήθηκε ιωδιούχος σκιαγραφική ουσία.

Η εγκυμοσύνη είναι επίσης ένας παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη και ο ιατρός θα πρέπει πάντα να ρωτά την ασθενή εάν υπάρχει ερχόμενη μη ορατή εγκυμοσύνη. Συνήθως στις περιπτώσεις αυτές δε συστήνεται η χορήγηση ρφ ιδίως τις πρώτες 12 εβδομάδες της κύησης προκειμένου ν' αποφευχθεί η έκθεση του εμβρύου στην ακτινοβολία. Εάν όμως κριθεί αναγκαία, τότε θα πρέπει η δόση να είναι ελαττωμένη, ειδικά όταν το ρφ περιέχει ιώδιο, και αυτό για την προστασία του θυρεοειδή αδένος του εμβρύου.

Προβλήματα μπορεί να υπάρξουν και στη γαλουχία καθώς ορισμένα ρφ περνούν στο μητρικό γάλα. Ο ιατρός θα πρέπει να γνωρίζει την κινητική του ρφ που χορήγησε και εάν είναι αναγκαία η χορήγηση του, τότε η μητέρα θα πρέπει να διακόψει τον θηλασμό για ένα μικρό χρονικό διάστημα που θα εξαρτηθεί από την ημιπερίοδο παραμονής στο σώμα του συγκεκριμένου ρφ.

Τέλος, σημασία έχει και η ηλικία του εξεταζόμενου. Στα παιδιά οι χορηγούμενες δόσεις είναι μικρές. Δεν υπάρχουν συγκριτικές μελέτες για τα περισσότερα ρφ για το κατά πόσο διαφοροποιείται η δράση τους στα ηλικιωμένα άτομα σε σχέση με τον υπόλοιπο πληθυσμό. Στην πράξη δεν έχουν διαπιστωθεί ανάλογα προβλήματα.

12.7. ΤΑ ΡΑΔΙΟΦΑΡΜΑΚΑ ΣΤΗ ΘΕΡΑΠΕΥΤΙΚΗ ΑΓΩΓΗ

Ορισμένα ρφ χρησιμοποιούνται σε μεγαλύτερες δόσεις για τη θεραπευτική αντιμετώπιση ορισμένων παθήσεων μεταξύ των οποίων συμπεριλαμβάνονται και οι νεοπλασίες. Στις περιπτώσεις αυτές, το ρφ προσλαμβάνεται κυρίως, αλλά δυστυχώς όχι μόνο, από τα νεοπλασματικά κύτταρα και τα καταστρέφει.

Ειδικές θεραπευτικές προσεγγίσεις αποτελούν, η χρήση ρφ στην αγωγή κατά του υπερθυρεοειδισμού και του καρκίνου του θυρεοειδούς, για την αντιμετώπιση του πόνου σε μεταστατικές παθήσεις των οστών και η χρήση του ραδιοφωσφόρου στην αληθινή πολυκυτταραιμία.

Τα ραδιοεπισημασμένα πεπτίδια καθώς και α ραδιοεπισημασμένα αντισώματα περιλαμβάνονται μεταξύ των χρησιμοποιούμενων θεραπευτικά ρφ. Η σύνθεση μάλιστα ιδιαίτερα εκλεκτικών ραδιοεπισημασμένων πεπτιδίων αποτελεί βασικό ερευνητικό στόχο.

Στις περιπτώσεις που ένα ρφ θα χρησιμοποιηθεί για θεραπευτικούς σκοπούς, θα πρέπει να γίνει σωστή αξιολόγηση για την ανάγκη επιλογής της θεραπευτικής αυτής αγωγής, να εξετασθούν οι ενδείξεις και οι αντενδείξεις και η αποτελεσματικότητα της προσέγγισης αυτής σε σχέση με άλλες θεραπευτικές μεθόδους. Θα πρέπει να υπάρχει η κατάλληλη εμπειρία για την αναγνώριση των πρώιμων και καθυστερημένων ανεπιθύμητων ενεργειών και να ληφθεί υπ' όψη η αθροιστική τοξικότητα που μπορεί να παρουσιασθεί από πιθανές παράλληλες θεραπευτικές αγωγές στις οποίες υποβάλλεται ο ασθενής.

Επίσης, θα πρέπει να λαμβάνονται πάντα υπ' όψη οι επιπτώσεις από την ακτινοβολία που εκπέμπει το ρφ τόσο για τον ίδιο τον ασθενή όσο και για την οικογένεια του και για τα άτομα με τα οποία έρχεται σε επαφή, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για άτομα μικρής ηλικίας.

12.8. ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΑ ΝΟΥΚΛΙΔΙΑ ΠΟΥ ΕΝΣΩΜΑΤΩΝΟΝΤΑΙ ΩΣ ΡΑΔΙΟΦΑΡΜΑΚΑ. ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΕΣ ΘΕΡΑΠΕΥΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η μέγιστη πλειοψηφία των ρφ αφορά ουσίες στις οποίες είναι ενσωματωμένο ένα ραδιενεργό νουκλίδιο. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται μόνο το ραδιενεργό νουκλίδιο με τη μορφή ιόντος ή την αδρανή μορφή. Όταν τα ρφ προορίζονται για τις εξετάσεις με την κάμερα PET, τότε στις περιπτώσεις αυτές το ραδιενεργό νουκλίδιο που εκπέμπει ποζιτρόνια παρασκευάζεται τοπικά σε κυκλοτρόνιο και ενσωματώνεται επίσης τοπικά στην απαραίτητη χημική ένωση. Αυτό γίνεται γιατί τα ραδιενεργά αυτά ισότοπα έχουν βραχύ (λίγες ώρες) χρόνο ημίσειας ζωής.

Παρακάτω αναφέρονται παραδείγματα ραδιονουκλιδίων (ρν) με τη μορφή ρφ και οι συνήθεις χρήσεις αυτών:

Ο άνθρακας-11(carbon-11 ή ^{11}C). Εκπέμπει ποζιτρόνια και χρησιμοποιείται για την απεικονιστική ινίνομελέτη του παραθυρεοειδή αδένου και των όγκων του εγκεφάλου. Χορηγείται ενδοφλέβια.

Ο άνθρακας-14 (carbon-14ή ^{14}C). Εκπέμπει β-ακτινοβολία και χρησιμοποιείται για *in vitro* μετρήσεις που σχετίζονται με αναπνευστική δοκιμασία που ανιχνεύει το ελκοβακτηρίδιο του πυλωρού και χορηγείται από το στόμα.

Το γάλλιο-68 (gallium-68 ή ^{68}Ga). Εκπέμπει ποζιτρόνια και χρησιμοποιείται για την απεικονιστική ινίνομελέτη νευρο-ενδοκρινικών όγκων. Χορηγείται ενδοφλέβια.

Το έρβιο-169 (erbium-169 ή ^{169}Er). Εκπέμπει β-ακτινοβολία και χρησιμοποιείται για τη θεραπεία αρθροπαθειών. Χορηγείται ενδοαρθρικά.

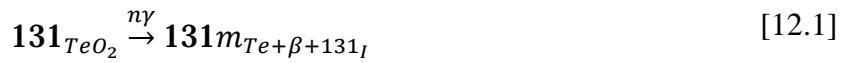
Το σαμάριο-153 (samarium-153 ή ^{153}Sm). Εκπέμπει β και γ-ακτινοβολία και χρησιμοποιείται για τη θεραπεία οστικών μεταστάσεων χορηγούμενη ενδοφλέβια.

Το θάλλιο-201 (thallium-201 ή ^{201}Tl). Εκπέμπει γ-ακτινοβολία, χορηγείται ενδοφλέβια και χρησιμοποιείται για την απεικονιστική ινίνομελέτη του θυρεοειδούς και των παραθυρεοειδών αδένων του μυοκαρδίου και ως μη εξειδικευμένο ρφ για την απεικόνιση όγκων.

Τα ιώδιο-123 (^{123}I), ιώδιο-125 (^{125}I) και ιώδιο-131 (^{131}I) εκπέμπουν όλα γ-ακτινοβολία και χρησιμοποιούνται για τη μελέτη του θυρεοειδή αδένου. Το ^{123}I λόγω του μικρού χρόνου υποδιπλασιασμού χρησιμοποιείται σε παιδιά. Εκ των τριών ρν, το ^{131}I διαθέτει και β-ακτινοβολία, ώστε χρησιμοποιείται και θεραπευτικός στη θεραπεία καλοήθων και κακοήθων θυρεοειδών παθήσεων.

Το ιώδιο (^{123}I , ^{125}I , ^{131}I και ^{132}I). Το ιώδιο όπως και τα F, Br, Cl και η αστατίνη ανήκουν στα αλογόνα και μάλιστα στη VII ομάδα του περιοδικού συστήματος. Το ιώδιο έχει την ηλεκτρονική δομή του αερίου κρυπτού. Τα οξειδωτικά του σθένη είναι -1 και +1,3,5 και

7. Τα σθένη +1 και -1 είναι τα συνηθέστερα για το ραδιενεργό νουκλίδιο ^{131}I . Το ^{131}I που συνήθως χρησιμοποιείται στην πράξη, παράγεται με τον επί εβδομάδες βομβαρδισμό του οξειδίου του τελλουρίου με νετρόνια:



Το ^{131}I παραλαμβάνεται στη συνέχεια με διάλυμα καυστικού νατρίου και απόσταξη. Ο θυρεοειδής αδένας προσλαμβάνει το ραδιενεργό ιώδιο σαν ιόν του ραδιοιωδίου ($^{131}\text{I}^-$). Η ραδιενεργός δόση στον εξεταζόμενο οφείλεται κυρίως στην εκπεμπόμενη β ακτινοβολία ενώ η ακτινοβολία γ ανιχνεύεται για διαγνωστικούς σκοπούς.

Η ιωδίσωση της τυροσίνης γίνεται με άμεσο τρόπο με 1-4 άτομα ιωδίου ανά μόριο τυροσίνης. Η οξειδωση του νατριοιωδίου (NAI) με χλωραμίνη Τα παρουσία και χλωριούχου ιωδιδίου (ICI), εξασφαλίζει ιωδίσωση μέχρι 100%. Πιο σύγχρονη μέθοδος ιωδίσωσης είναι η ηλεκτρολυτική μέθοδος. Η πρωτεΐνη και το ραδιενεργό ιώδιο τοποθετούνται σε κάψα πλατίνας (άνοδος) ενώ η κάθοδος αποτελείται από ηλεκτρόδιο πλατίνας. Μεταξύ των δύο πόλων υπάρχει μεμβράνη από σελοφάνη. Με τη δίοδο του ρεύματος οξειδώνεται το ιώδιο και ιωδώνεται η πρωτεΐνη. Κατά την ενζυματική μέθοδο το ένζυμο λακτοπεριδάση ευνοεί την οξειδωση του ιωδίου παρουσία υπεροξειδίου του υδρογόνου σε κατάλληλο ρυθμιστικό διάλυμα. Η ενζυματική μέθοδος χρησιμοποιείται στην επισήμανση της τρανσφερίνης, του ινωδογόνου κ.α. και είναι σημαντική διότι εκτός από τη μεγάλη της απόδοση, δεν αλλοιώνει βιολογικά την ιωδιούμενη πρωτεΐνη.

Το στρόντιο-89 (strontium-89 ή ^{89}Sr). Εκπέμπει β-ακτινοβολία και χρησιμοποιείται ενδοφλέβια για τη θεραπεία οστικών μεταστάσεων.

Το τεχνήτιο-99m (technetium-99m ή ^{99m}Tc). Εκπέμπει μόνο γ-ακτινοβολία. Ως ^{99m}Tc μετασταθερό υπερτεχνητικό νάτριο χορηγείται ενδοφλέβια για την απεικόνιση του στομάχου, των σιαλογόνων αδένων, των εκ κολωμάτων Meckel και στη δακτυοκυστογραφία. Επίσης χρησιμοποιείται για την απεικόνιση του θυρεοειδούς αδένου και για τη μέτρηση της πρόσληψης του από το θυρεοειδή. Τέλος χρησιμοποιείται για απεικονιστικές μελέτες πρώτης αγγειακής δίοδου σε μελέτες καρδιάς. Το ^{99m}Tc συνδεδεμένο με ανθρώπινη λευκωματίνη και με άλλες ουσίες ή με τα ερυθρά αιμοσφαίρια χορηγούμενο ενδοφλέβια χρησιμοποιείται για την απεικόνιση των καρδιακών κοιλοτήτων, για απεικονιστικές μελέτες της αιμάτωσης του μυοκαρδίου, το σπινθηρογράφημα των οστών (^{99m}Tc -MDP) και των όγκων του εγκεφάλου (^{99m}Tc -DTPA). Το ίδιο ρφ χορηγούμενο με την μορφή εισπνεόμενου διαλύματος χρησιμεύει για την απεικονιστική μελέτη του αερισμού των πνευμόνων. Επίσης ως ^{99m}Tc -DMSA (dimercaptosuccinic acid: διμερκαπτοσουκκινικό οξύ) χρησιμεύει για την απεικόνιση των νεφρών και του ήπατος χορηγούμενο ενδοφλέβια. Με τη μορφή του κολλοειδούς ^{99m}Tc χρησιμοποιείται ενδοφλέβια για την απεικόνιση του μυελού των οστών και των αιμορραγιών του γαστρεντερικού σωλήνα. Άλλες εφαρμογές ρφ που περιέχουν ^{99m}Tc αφορούν τη μελέτη των χοληφόρων οδών, τη λειτουργία των νεφρών, των φρουρών λεμφαδένων, ορισμένων όγκων, φλεγμονών κ.α.

Το ραδιενεργό μετασταθερό τεχνήτιο (^{99m}Tc) παρασκευάστηκε το 1937 με το βομβαρδισμό του μολυβδαινίου με δευτερόνια από το κυκλοτρόνιο. Το Tc ανήκει στην VIIA ομάδα του περιοδικού συστήματος μαζί με το μαγγάνιο. Στην πράξη το μετασταθερό τεχνήτιο παραλαμβάνεται από στήλη ραδιενεργού μολυβδαινίου (^{99}Mo) με διάλυμα χλωριούχου νατρίου. Έχει ημιδιάρκεια ζωής 6,08 ώρες και μεταπίπτει στο ^{99}Tc (ημιδιάρκεια ζωής $2,12 \times 10^5$ χρόνια) που έχει πολύ χαμηλή ειδική ραδιενέργεια και δε χρησιμοποιείται στην πράξη.

Το ^{99}Tc έχει την ηλεκτρονική δομή του αερίου κρυπτού και οξειδωτικό σθένος από -1 ως +7. Το οξειδωτικό σθένος παριστά

το ηλεκτρικό ή ιοντικό φορτίο του ιόντος ή της ρίζας του ρν. Είναι επόμενο ότι σε κατάσταση ηρεμίας το σθένος αυτό είναι μηδέν. Οι αναγωγικές ουσίες όπως το ασκορβικό οξύ, ο SnCl_2 , FeCl_2 , κ.α. χρησιμοποιούνται για να ελαττώσουν το οξειδωτικό σθένος του νουκλιδίου, ώστε να είναι δυνατή η σύνδεση του νουκλιδίου με κάποια άλλη ουσία π.χ. αλβουμίνη ή κολλοειδές ή MDP.

Ο ποιοτικός έλεγχος της καθαρότητας του ρφ που περιέχει ραδιενεργό τεχνητίο γίνεται με χρωματογραφία επί χάρτου ή λεπτής στοιβάδας, με ανταλλαγή ιόντων ή με στήλη sephadex.

Οποσοτικός έλεγχος χρειάζεται όταν υποπτευόμαστε ότι στο διάλυμα του παρασκευασθέντος ρφ που πρόκειται να χρησιμοποιήσουμε υπάρχει και κάποια ποσότητα ελεύθερου ή υδρολυθέντος (με την έντονη επίδραση αναγωγικών ουσιών) ραδιενεργού τεχνητίου. Ο διαχωρισμός των μορφών αυτών του νουκλιδίου μπορεί να γίνει με τη χρωματογραφία όταν το εξεταζόμενο δείγμα βρίσκεται σε διάλυμα χλωριούχου νατρίου.

Η βιολογική κατανομή του τεχνητίου είναι όμοια με την κατανομή του ιωδίου (εκτός από τη σύνδεση του με την τυροσίνη). Άρα το ραδιενεργό τεχνητίο χρησιμοποιείται στη σπινθηρογράφιση του θυρεοειδή αδένου.

Η αποστείρωση των διαφόρων ραδιενεργών κολλοειδών διαλυμάτων γίνεται όχι σε αυτόκαυστο αλλά με ειδικό ηθμό με πόρους διαμέτρου περί τα 220nm σε άσηπτο περιβάλλον. Η μακροκαθιζήθεια αλβουμίνη και άλλα μακρομόρια δεν περνούν τον παραπάνω ηθμό. Π.χ. το κολλοειδές $99\text{m}_{\text{Tc-S}}$ που έχει διάμετρο σωματιδίων μέχρι 1000nm, φαγοκυτταρώνεται και καθιλώνεται στα κύτταρα του Kupffertou ήπατος ώστε χρησιμοποιείται για τη σπινθηρογράφιση του ήπατος.

Το ύτριο-90 (yttrium-90 ή 90Y). Εκπέμπει β-ακτινοβολία και χρησιμοποιείται για τη θεραπεία αρθρικών παθήσεων χορηγούμενο ανδαρθρικά. Η β ακτινοβολία που εκπέμπει το ρν αυτό, κατά την επισήμανση του με αντισώματα ή νευροενδοκρινείς υποδοχείς, επιτρέπει να χρησιμοποιείται διαγνωστικός και θεραπευτικός στην τοπική ακτινοβόληση όγκων, στην υπόφυση, στον υπεζωκοτικό, στον περιτοναϊκό, τον ενδοαρθρικό χώρο κ.α. Για την ενδαρθρική υμενεκτομή εκτός από το 90Y χρησιμοποιούνται τα ρν του έρβιου και του ρήνιου.

Το φθόριο-18 (fluoride-18 ή 18F). Εκπέμπει ποζιτρόνια και χρησιμοποιείται για την απεικονιστική και τη λειτουργική ινβινομελέτη διαφόρων οργάνων με την κάμερα PET.

Το γάλλιο (68Ga και 67Ga). Τα γάλλιο, βόριο, αλουμίνιο και ίνδιο βρίσκονται στην ΠΒ ομάδα του περιοδικού συστήματος. Η ηλεκτρονική δομή του γάλλιου είναι όμοια με εκείνη του κρυπτού. Το γάλλιο παρουσιάζει διάφορα σύμπλοκα ιόντα με οξειδωτικά σθένη +1, +2 και +3. Οι συμπλοκές ενώσεις του γάλλιου υδρολύονται εύκολα διότι σε αυτές το γάλλιο συμμετέχει με μεγάλο ιοντικό σθένος (+3). Το γάλλιο έχει αμφοτερικές ιδιότητες, δηλαδή ιδιότητες βάσης και οξέος. Σε pH μεγαλύτερο από 2 όπως είναι βέβαιο το pH στο πλάσμα, το γάλλιο γίνεται αδιάλυτο και παραλαμβάνεται από το δικτυοενδοθηλιακό σύστημα του οργανισμού. Στο εμπόριο κυκλοφορούν γεννήτριες γερμανίου που όταν εκλύονται με διάλυμα EDTA δίνουν το 68Ga-EDTA . Το 68Ga επειδή εκπέμπει ποζιτρόνια είναι κατάλληλο για ποσοτικές μετρήσεις με την PET κάμερα.

Το ίνδιο (113In , 111In και 113mIn). Το ίνδιο έχει ηλεκτρονική δομή όπως το αέριο ξένο. Όπως και το γάλλιο, παρουσιάζεται με οξειδωτικό σθένος από +1 ως +3. Όταν διαθέτει σθένος +3, έχει επίσης τάση να υδρολύεται αλλά μικρότερη από όση το γάλλιο (διότι το γάλλιο έχει μικρότερη ιοντική ακτίνα). Όταν αυξάνεται το pH του διαλύματος του πάνω από 3 περίπου, το ίνδιο σχηματίζει κολλοειδή ή αδιάλυτα μείγματα. Στο εμπόριο υπάρχει η στήλη κασσίτερου από την οποία εκλύεται το 113mIn με διάλυμα υδροχλωρικού οξέος.

13. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΕ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΟ ΙΧΝΗΘΕΤΗ. ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

13.1. Η ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΑΡΑΙΩΣΗΣ (ISOTOPE DILUTION PRINCIPLE) ΓΙΑ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ

Η αρχή της αραιώσης εφαρμόζεται π.χ. στη μέτρηση του όγκου (O_0) μιας δεξαμενής, η οποία περιέχει κάποιο υδατικό διάλυμα ή έστω μόνο νερό: Προσθέτουμε μια ποσότητα ραδιενεργού νερού ($*O_0$) γνωστής ραδιενέργειας (P_0) και μετά την πλήρη ανάμειξη παίρνουμε ένα δείγμα του αναμειχθέντος διαλύματος και εξετάζουμε τη ραδιενέργεια του (ρ_1) και τον όγκο του O_1 . Κατά τον τύπο: $P_0/*O_0 + O_0 = \rho_1/*O_1 + O_1$ απλοποιώντας ως προς τους όγκους ($*O_0$) και (O_1) έχουμε: $O_0 = P_0/\rho_1 \times \rho_1$ όπου όλοι οι παράγοντες εκτός του ζητούμενου όγκου είναι γνωστοί.

13.2. Η ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΟΛΙΚΟΥ ΑΝΤΑΛΛΑΞΙΜΟΥ ΝΑΤΡΙΟΥ (TOTAL EXCHANGEABLE SODIUM)

Δίνεται ενδοφλέβια ή από το στόμα μια γνωστή ποσότητα έστω $37\text{KBq}^{24}\text{NaCl}$ με γνωστό όγκο (έστω 5mL) και συλλέγονται τα ούρα του επόμενου 24ώρου. Μετά 24h παίρνουμε ένα δείγμα αίματος και σε αυτό ξεχωρίζουμε αμέσως το πλάσμα και το μετράμε ως προς τη ραδιενέργεια και ως προς το σταθερό Ναπου περιέχει (το Ναμετράται φλογοφωτομετρικά). Επίσης και εδώ όπως συμβαίνει και στη μέτρηση του όγκου του πλάσματος, ετοιμάζεται ένα σταθερό διάλυμα αναφοράς που περιέχει την εντεθείσα ποσότητα ραδιενέργειας 37 KBq αραιωμένη σε ένα λίτρο φυσιολογικού ορού. Έτσι ξέρουμε την ολική εντεθείσα ή χορηγηθείσα ποσότητα ραδιενέργειας (P_0). Μετά 24h, όταν πια θα έχουν πλήρως αναμειχθεί στο πλάσμα το ραδιενεργό και το μη ραδιενεργό νάτριο, η πυκνότητα και των δυο θα είναι η ίδια τόσο στο πλάσμα όσο και στους ιστούς. Μπορούμε λοιπόν να πούμε ότι η αναλογία ή η σχέση που υπάρχει σε κάθε περίπτωση μεταξύ της πυκνότητας του ραδιενεργού νατρίου στο πλάσμα (A) και του παραμένοντος στο σώμα (B) μετά 24h θα βρίσκεται σε αντιστοιχία με την πυκνότητα του σταθερού νατρίου στο πλάσμα (Γ) και του ανταλλάξιμου νατρίου του σώματος (Δ). Άρα, $A/B = \Gamma/\Delta$ και λύνοντας ως προς τον άγνωστο Δ έχουμε: $\Delta = \Gamma \times B/A$. Από τους παραπάνω άγνωστους, το (Γ) μετράται (πυκνότητα νατρίου πλάσματος). Το ραδιενεργό νάτριο του σώματος ισούνται με τη χορηγηθείσα μείον την αποβληθείσα στα ούρα ραδιενέργεια (B) και το ραδιενεργό νάτριο του πλάσματος μετράται στο δείγμα των 24h (A). Έτσι λύνουμε την εξίσωση με άγνωστο το ζητούμενο ολικό ανταλλάξιμο νάτριο.

Αν έχουμε σαν αριθμητικό παράδειγμα: $\Gamma = 0,15\text{mmolNa}$, $B = 30 \times 10^6$ κρούσεις ανά λεπτό (χορηγηθείσα μείον αποβληθείσα ραδιενέργεια σε 24h) και $A = 2 \times 10^3$ (η ειδική ραδιενέργεια του νατρίου του πλάσματος), τότε θα έχουμε: Ολικό ανταλλάξιμο νάτριο (Δ),

δηλαδή: $(\Delta)=0,15 \times 30 \times 10^6/2 \times 103=2250\text{mmolNa}$. Και εδώ εφαρμόστηκε η αρχή της αραίωσης.

13.3. ΚΙΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ - ΜΕΛΕΤΕΣ ΡΟΗΣ - ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Ο ρυθμός (P) με τον οποίον εκρέει ένα υγρό από μια οπή δεξαμενής εξαρτάται από τον ολικό όγκο του υγρού της δεξαμενής (O_1) ή αλλιώς από το ύψος της στήλης του υγρού στη δεξαμενή. Υπάρχει άρα, σταθερή σχέση (K) μεταξύ ρυθμού εκροής (P) και ολικού όγκου (O_1). Το K ονομάζεται σταθερά του ρυθμού εκροής (constantrate). Ο όγκος που κάθε φορά παραμένει στη δεξαμενή (ΟΠ) ακολουθεί μια απλή εκθετική συνάρτηση. Άρα θα έχουμε: $OΠ=O_1xe^{-kt}$ ή $OΠ/O_1=e^{-kt}$. Λογαριθμώντας τη σχέση έχουμε: $\ln x OΠ/O_1=-kt$

Όταν ο χρόνος μιας παρατήρησης συμπίπτει με το χρόνο υποδιπλασιασμού του ολικού όγκου του υγρού της δεξαμενής, τότε θα έχει ελαττωθεί στο μισό ο αρχικός όγκος O_1 και: $OΠ/O_1$ θα ισούται με 0,5. Άρα, στην παραπάνω περίπτωση μπορούμε να πούμε ότι ο \ln του 0,5=-0,693 και η παραπάνω εξίσωση γίνεται: $-0,693=kt^{1/2}$ και $0,693=kt^{1/2}$. Άρα: $t^{1/2}=0,693/k$.

Όπως είναι φανερό η σταθερά εκροής (k) καθορίζει την κλίση της παραπάνω καμπύλης: $k=0,693/t^{1/2}$

Το παραπάνω φαινόμενο ακολουθεί διαδρομή ανάλογη με εκείνη του φαινομένου της ραδιενεργού διάσπασης.

Ανά όγκο του υγρού σε μια δεξαμενή παραμένει σταθερός (O_0) ενώ στη μονάδα του χρόνου ίση ποσότητα υγρού εισρέει και εκρέει στη δεξαμενή και αν ο αρχικός όγκος έχει πυκνότητα μιας ραδιενεργού ουσίας Σ_0 , τότε κατά τη διαδρομή του παραπάνω φαινομένου η πυκνότητα της ουσίας αυτής θα μεταβάλλεται σύμφωνα με την εξίσωση: $\Sigma_x=\Sigma_0e^{-kt}$ (το κείναι η σταθερά ρυθμού εκροής). Η αρχή αυτή βρίσκει εφαρμογή σε πολλά βιολογικά φαινόμενα, όπου μια φυσιολογική ουσία, π.χ. ο σίδηρος, η κρεατινίνη, το DTPA, το ιππουράν ή το κάλιο εισέρχεται και εξέρχεται σε ένα χώρο-δεξαμενή, όπως είναι ο χώρος του αίματος. Η μελέτη αυτή ονομάζεται Διαμερισματική ανάλυση.

Μέτρηση του ρυθμού ανταλλαγής διαφόρων μετάλλων του πλάσματος

Η ανταλλαγή του σιδήρου στο ολικό πλάσμα και ανά πρώτο λεπτό σε μg (Αντ. FeΠλ.) βρίσκεται από τη σχέση: (Αντ. FeΠλ.)=Όγκος Πλ.x FeΠλ.xk. Και αν: Όγκος πλάσματος=2.88mL, Feορού (ή πλάσματος): $1\mu\text{g/mL}$ και $k=0,0087$ ($0,693/t^{1/2}:80\text{min}$), τότε ο ανταλλάξιμος σίδηρος του πλάσματος θα είναι: $2.800 \times 1 \times 0,0087=24\mu\text{gFe/min}$. Ανάλογες μετρήσεις γίνονται και για το ρυθμό ροής άλλων μετάλλων ή συστατικών.

Μετρήσεις ροής.

α) Πρόκειται για ποσοτικές μετρήσεις σχετικές με τη ροή του αίματος ή της λέμφου στα διάφορα όργανα, σε ιστούς ή σε διάφορους χώρους. Αν π.χ ενώσουμε σε έναν χώρο 0,1mL διαλύματος ραδιενεργού ξένου (^{133}Xe) με ενεργότητα 3,7MBq, μπορούμε με ειδικό ανιχνευτικό κατευθυντήρα εξωτερικής διαμέτρου 10 cm να εξετάσουμε το ρυθμό με τον οποίο η ραδιενεργός ουσία απομακρύνεται στο χρόνο από το χώρο. Ο υπολογισμός ή η μέτρηση του ρυθμού αυτού γίνεται είτε με μετρήσεις ανά 10sec, είτε με ρυθμόμετρο. Η εξέταση διαρκεί περί τα 15min. Η καμπύλη που παίρνουμε αποτελείται συνήθως από δυο συνιστώσες με ρυθμούς κάθαρσης k_1 και k_2 και με σταθερές συσχέτισης σ_1 και σ_2 . Η αιματική ροή σε mL/γιστού υπολογίζεται με την εξίσωση:

$$\text{Αιματική ροή}=\lambda x \sigma_1 x k_1 + \sigma_2 x k^2 / \sigma_1 + \sigma_2. \quad [13.1]$$

Το λ είναι ο συντελεστής συμμετοχής για το συγκεκριμένο ραδιενεργό ισότοπο (ιχνηθέτη) και εκφράζει τον ολικό όγκο του αίματος στον οποίο κατανέμεται ο ιχνηθέτης, σε mL/γιστού. Επειδή το ραδιενεργό ξένο είναι λιποδιαλυτό, το λ εξαρτάται και από την περιεκτικότητα των ιστών σε λίπος. Για τη μέτρηση της αιματικής ροής στους μυς κλπ. Χρησιμοποιείται και το ραδιενεργό νάτριο κ.α., ενώ για τη μέτρηση της λεμφικής ροής, κολλοειδή διαλύματα όπως το $^{131}\text{I}_{\text{HAS}}$ κ.α.

β) Η μέτρηση του ρυθμού σπειραματικής διήθησης (glomerularfiltrationrate). Πρόκειται για τον όγκο του πλάσματος που καθαρίζεται από μια ουσία από το νεφρό ανά λεπτό με μόνη τη λειτουργία της σπειραματικής διήθησης. Σαν ρφ χρησιμοποιείται συνήθως το διαιθυλενο-τριαμινοπενταοξικό ραδιενεργό τεχνήτιο ($^{99\text{m}}\text{Tc-DTPA}$).

Υπάρχουν πολλές νεότερες σχετικές τεχνικές.

13.4. ΡΑΔΙΟΑΝΟΣΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΞΕΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

Οι εξετάσεις αυτές αφορούν τις γνωστές Ραδιοανοσολογικές εξετάσεις (radioimmunoassay-RIA), τις νεότερες ραδιοανοσομετρικές εξετάσεις (immune radio metric-IRMA) και τις ραδιοανοσοκαθιζήσεις (radio immune precipit ation - RIPA). Η τελευταία αφορά τη σύνδεση αφενός των ραδιοεπισημασμένων προϊόντων λύσεως (lysates) διαφόρων ιών ή προσβεβλημένων από παθογόνα αίτια κυττάρων , προς το εξεταστέο δείγμα του ορού που ενέχει ενδεχόμενα τα αντίστοιχα αντισώματα. Έτσι εξετάζεται ο ορός για την ύπαρξη π.χ. αντισωμάτων έναντι του ιού HIV του AIDS κλπ. Αν ο ορός περιέχει τα αντίστοιχα αντισώματα παρατηρείται ανάλογο ραδιενεργό ίζημα.

Και εδώ παρατηρούμε ότι η πυρηνική ιατρική είναι απαραίτητη στην κλινική διάγνωση, αφού οι εξετάσεις RIA-IRMA είναι πολύ μεγαλύτερης ακρίβειας ως προς τις εξετάσεις ELISA. Για το λόγο αυτό εφαρμόζονται και σε ιατροδικαστικές DNAεξετάσεις ταυτοποίησης.

14. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ - ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ, ΜΟΝΑΔΕΣ ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ

14.1. ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΔΟΣΗ (D)

Στην ακτινοπροστασία χρησιμοποιείται η Δκυρίως με την έννοια της μέσης απορροφούμενης δόσης ιστών ή οργάνων, δηλαδή αφορά το πηλίκο της ολικής ενέργειας E σε joule που εναποτίθεται στον ιστό ή στο όργανο δια της μάζας m του ιστού ή του οργάνου, $D=E/m$. Μονάδα απορροφούμενης δόσης είναι το Gray, $1\text{Gy}=1\text{Jkg}^{-1}$.

14.2. ΓΡΑΜΜΙΚΩΣ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ (LET)

Η LET δίνει τη μεταφορά ενέργειας από την ακτινοβολία στην ύλη ανά μονάδα μήκους διαδρομής της ακτινοβολίας εντός της ύλης και συνήθως εκφράζεται σε keV/μm.

14.3. ΣΧΕΤΙΚΗ ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΣ (RBE)

Για τη σύγκριση των βιολογικών αποτελεσμάτων από ακτινοβολίες με διαφορετική LET, υπάρχει η έννοια της σχετικής βιολογικής αποτελεσματικότητας, RBE. Ορίζεται σαν ο λόγος της απαιτούμενης απορροφούμενης δόσεως ακτινοβολίας αναφοράς χαμηλής LET (συνήθως ακτινοβολία γ από πηγή ^{60}Co ή φωτόνια ακτινών X 60-120 keV) προς τη δόση της υπό εξέταση ακτινοβολίας R που προκαλεί την αυτή βιολογική απόκριση.

Για τις ανάγκες της ακτινοπροστασίας έχουν σημασία οι τιμές RBE για τους διάφορους ιστούς και όργανα σε ότι αφορά την πρόκληση στοχαστικών αποτελεσμάτων (καρκινογένεσεις, κληρονομικά αποτελέσματα) που οφείλονται σε χαμηλές δόσεις και χαμηλό ρυθμό δόσεων. Είναι προφανές ότι η RBE εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη LET που και αυτή εξαρτάται από την ενέργεια και το είδος της ακτινοβολίας.

14.4. ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ (W_R)

Για τις ανάγκες της ακτινοπροστασίας έχει εισαχθεί η έννοια ενός αδιάστατου παράγοντα, του παράγοντα βαρύτητας ακτινοβολίας W_R . Η τιμή αυτού του παράγοντα βασίζεται σε τιμές της RBE που έχουν προκύψει κυρίως από in vivo ερευνητικές εργασίες επί ζώων. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές W_R πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο σε περιπτώσεις υπολογισμού της ενεργού δόσης για λόγους περιορισμού και ελέγχου των δόσεων. Σε περιπτώσεις που υπάρχει ανάγκη αξιολόγησης των στοχαστικών αποτελεσμάτων σε

συγκεκριμένο άτομο ή ομάδα ατόμων μετά από ακτινοβόληση τους από συγκεκριμένη πηγή ή πηγές, τότε αντί του W_R πρέπει να χρησιμοποιούνται ακριβέστερες πηγές RBE από τη βιβλιογραφία. Για τις ακτινοβολίες X,γ τα ηλεκτρόνια και τα ποζιτρόνια η τιμή W_R είναι 1. Για τα πρωτόνια 2 ενώ για την ακτινοβολία α λαμβάνει την τιμή 20.

14.5. ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΔΟΣΗ ($H_{T,R}$)

Η ισοδύναμη δόση $H_{T,R}$ σε ιστό ή όργανο T από την ακτινοβολία R, ορίζεται από το γινόμενο:

$$H_{T,R} = W_R D_{T,R} \quad [14.1]$$

Όπου:

$D_{T,R}$ = η μέση απορροφούμενη δόση από την ακτινοβολία R στο ιστό ή όργανο T
 W_R = ο παράγων βαρύτητας της ακτινοβολίας. Μονάδα είναι το 1Sv (Sievert) με διαστάσεις $1\text{jk}g^{-1}$.

Αν το όργανο εκτίθεται σε πεδίο ακτινοβολιών διαφόρων τύπων και ενεργειών, τότε η ολική ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας H_T υπολογίζεται σαν άθροισμα των επιμέρους ισοδύναμων δόσεων $H_T = \sum W_R D_{T,R}$. Όπου $D_{T,R}$ η μέση απορροφούμενη δόση στο όργανο T από την ακτινοβολία R.

14.6. ΠΑΡΑΓΩΝ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΙΣΤΟΥ (W_T)

Η πιθανότητα εμφάνισης στοχαστικών αποτελεσμάτων λόγω της ισοδύναμης δόσης ακτινοβολίας εξαρτάται από τον ακτινοβοληθέντα ιστό ή όργανο που την προσέλαβε. Ο παράγων που επιπλέον σταθμίζει την ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας ως προς το όργανο ή τον ιστό που την απορρόφησε, ονομάζεται παράγων βαρύτητας ιστού W_T .

Οι τιμές των W_T έχουν επιλεγεί έτσι ώστε μια ομοιογενής ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας σε όλο το σώμα να δίνει ενεργό δόση αριθμητικώς ίση με αυτή την ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας. Σε αυτήν την περίπτωση το άθροισμα των παραγόντων βαρύτητας ιστού είναι ίσο με τη μονάδα. Στον Πίνακα 19 αναφέρονται οι τιμές του W_T για τα διάφορα όργανα ή ιστούς.

Στο «Υπόλοιπο σώματος» στον πίνακα περιλαμβάνονται 14 ιστοί ήτοι επινεφρίδια, συνδετικός ιστός, εξ θωρακικοί αεροφόροι οδοί, χοληδόχος κύστη, τοίχωμα της καρδιάς, λεμφικοί αδένες, μύες, πάγκρεας, τοίχωμα λεπτού εντέρου, σπλήνας, θύμος αδύ. και μήτρα-κόλπος. Η τιμή 0.12 του πίνακα εφαρμόζεται στην μέση δόση των οργάνων αυτών λαμβανομένων ως ενός.

Οι τιμές του W_T στον πίνακα προτείνονται από την ICRP, αφού για τον προσδιορισμό τους έχουν ληφθεί υπόψη ο ρυθμός θανάτων λόγω καρκίνου, η απώλεια των ετών ζωής και τέλος μια σταθμισμένη συνεισφορά των μη θανατηφόρων καρκίνων και των κληρονομικών ανωμαλιών.

Ιστός ή όργανο W_T	Τιμές
Ερυθρός μυελός οστών	0,12
Μαστός	0,12
Παχύ έντερο	0,12
Πνεύμονες	0,12
Στόμαχος	0,12
Ουροδόχος κύστη	0,04
Οισοφάγος	0,04
Γονάδες	0,08
Ήπαρ	0,04
Θυρεοειδής	0,04
Επιφάνεια οστού	0,01
Εγκέφαλος	0,01
Σιαλογόνοι αδένες	0,01
Δέρμα	0,01
Υπόλοιπο σώματος	0,12
Άθροισμα	0,01

Πίνακας 19: Παράγων βαρύτητας ιστού

14.7. ΕΝΕΡΓΟΣ ΔΟΣΗ (E)

Η διπλά σταθμισμένη μέση απορροφούμενη δόση όλων των ακτινοβοληθέντων ιστών και οργάνων ονομάζεται ενεργός δόση, E. Λαμβάνοντας υπόψη όλους τους προηγούμενους ορισμούς, ισχύει:

$$E = \sum W_T \sum W_R D_{T,R} \quad [14.2]$$

Μονάδα είναι το 1Sv (Sievert) με διαστάσεις 1Jkg^{-1} .

Η ακτινοβόληση μπορεί να οφείλεται σε πηγή ή πηγές ακτινοβολίας εκτός του σώματος, σε πηγή ή πηγές που υπάρχουν μέσα στο σώμα, δηλαδή ραδιονουκλίδια ή σε συνδυασμό αυτών.

Η έννοια της ενεργού δόσης είναι η εξής: Είναι η απορροφούμενη δόση που αν λαμβάνονταν ομοίμορφα από ολόκληρο το σώμα, θα προκαλούσε τα ίδια στοχαστικά βιολογικά αποτελέσματα (κυρίως καρκινογενέσεις), με την πραγματική ακτινοβόληση. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές και οι υπολογισμοί αφορούν «άνθρωπο αναφοράς», δηλαδή ομοίωμα ανθρώπου τυποποιημένο, και όχι συγκεκριμένο άτομο. Χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό, τη βελτιστοποίηση και την αξιολόγηση των λαμβανόμενων μέτρων ακτινοπροστασίας.

14.8. ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΔΟΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Στην περίπτωση που η ακτινοβόληση οφείλεται σε είσοδο ραδιενεργού υλικού στον οργανισμό, η εναποτιθέμενη ενέργεια εξαρτάται από την κατανομή του υλικού στον χρόνο,

που έχει σχέση με τη βιοκινητική του συμπεριφορά. Για το σκοπό αυτό, έχει εισαχθεί η έννοια της δεσμευμένης ισοδύναμης δόσης $H_T(T)$ που είναι το χρονικό ολοκλήρωμα για το χρονικό διάστημα T_a της ακτινοβολήσης του ιστού ή οργάνου. Αν δεν προσδιορίζεται αυτό το χρονικό διάστημα, τότε για τους ενήλικες λαμβάνονται τα 50 έτη και για τα παιδιά τα 70. Με τη χρήση των συντελεστών βαρύτητας ιστού υπολογίζεται κατ' αναλογία με τα προηγούμενα και η ενεργός δεσμευμένη δόση $E(T)$.

14.9. ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗ ΑΠΟ ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

Οι δόσεις οι οποίες απορροφώνται από τον άνθρωπο και οφείλονται σε φυσικές πηγές ακτινοβολήσης συμμετέχουν κατά μεγάλο ποσοστό στο σχηματισμό της συλλογικής δόσης του γήινου πληθυσμού.

Οι φυσικές πηγές ακτινοβολήσης ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες: α) Εξωτερικές πηγές με εξωγήινη προέλευση, δηλαδή η κοσμική ακτινοβολία, και με γήινη προέλευση, δηλαδή ραδιονουκλίδια, τα οποία υπάρχουν στο έδαφος, στα οικοδομικά υλικά και στον αέρα. β) Εσωτερικές πηγές, οι οποίες αποτελούνται από ραδιονουκλίδια, τα οποία υπάρχουν στη φύση και εισέρχονται στο ανθρώπινο σώμα με την αναπνοή ή την κατάποση.

Η μέση ετήσια ενεργός δόση ανθρώπου του πλανήτη μας από φυσικές πηγές ακτινοβολήσης υπολογίζεται σε 2,4mSv από τα οποία το 1,2mSv από εσωτερικές πηγές κυρίως το ραδόνιο (Πινάκας 20).

Πηγή	Ενεργό ισοδύναμο δόσης, mSv	Εύρος τιμών mSv
Εξωτερική ακτινοβολήση	0,4	0,3-1,0
Κοσμική ακτινοβολία	0,5	0,3-0,6
Γήινη γ ακτινοβολία		
Εσωτερική ακτινοβολήση		
Αναπνοή (κυρίως ραδόνιο)	1,2	0,2-1,0
Κατάποση	0,3	0,2-0,8
Σύνολο	2,4	1-10

Πίνακας 20: Εκτίμηση ετήσιας ενεργού δόσης σε παγκόσμιο επίπεδο από φυσικές πηγές σε περιοχές με κανονική ακτινοβολία υποστρώματος

14.10. ΚΟΣΜΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Η ακτινοβολία υψηλής ενέργειας που εισέρχεται στη γήινη ατμόσφαιρα από το διάστημα ονομάζεται κοσμική ακτινοβολία ή ακριβέστερα πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία. Όταν αυτή αλληλοεπιδρά με τους πυρήνες των στοιχείων στη γήινη ατμόσφαιρα, παράγονται σωματίδια και ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες που ονομάζονται δευτερογενής κοσμική ακτινοβολία.

Η πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία είναι κυρίως γαλαξιακής ή εξ γαλαξιακής προέλευσης και αποτελείται από υψηλής ενέργειας πρωτόνια ($\approx 89\%$), ιόντα ^4He (10%) και μικρό ποσοστό βαρύτερων σωματιδίων, ηλεκτρονίων, φωτονίων και νετρίνων. Η ροή της

κοσμικής ακτινοβολίας επηρεάζεται από το γήινο μαγνητικό πεδίο με αποτέλεσμα τα χαμηλής ενέργειας σωματίδια να ανακλώνται προς το διάστημα.

Αυτό το φαινόμενο εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος με αποτέλεσμα στα υψηλότερα σημεία της ατμόσφαιρας η ροή σωματιδίων χαμηλής ενέργειας να είναι μεγαλύτερη στους πόλους από εκείνη στον ισημερινό.

Η πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία έχει και μια συνιστώσα, η οποία οφείλεται στη δραστηριότητα του Ήλιου, ο οποίος βομβαρδίζει τη Γη με πρωτόνια και σωματίδια α . Αυτά όμως είναι μικρής ενέργειας και δε δημιουργούν σημαντική αύξηση στη δόση στην επιφάνεια της Γης.

Όταν η πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία εισέρχεται στην ατμόσφαιρα, τα υψηλής ενέργειας σωματίδια της δημιουργούν πυρηνικές αντιδράσεις με τους πυρήνες των ατόμων του ατμοσφαιρικού αέρα.

Κατά τις αντιδράσεις αυτές παράγονται νετρόνια, πρωτόνια, πόνια, Καόνια και νουκλίδια, τα κοσμογενή νουκλίδια, όπως ^3H , ^7Be , ^{10}Be , ^{20}Na και ^{24}Na . Τα πρωτόνια, νετρόνια και πόνια αντιδρούν περαιτέρω με πυρήνες και δημιουργούν και άλλα δευτερογενή σωματίδια. Το φαινόμενο ονομάζεται καταρράκτης. Τα νετρόνια και πρωτόνια που υπάρχουν στη δευτερογενή κοσμική ακτινοβολία συμμετέχουν ουσιωδώς στη δόση στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας.

Τα φυτά και τα δέντρα προσλαμβάνουν ^{14}C από την ατμόσφαιρα με τη μορφή CO_2 . Υπολογίζοντας τη συγκέντρωση του ^{14}C σε δείγμα φυτού και με τη βοήθεια του φυσικού χρόνου υποδιπλασιασμού είναι δυνατός ο προσδιορισμός της ηλικίας του φυτού. Αυτό αποτελεί βασική μέθοδο της ραδιοχρονολόγησης.

Στο επίπεδο της θάλασσας η ετήσια ενεργός δόση λόγω της κοσμικής ακτινοβολίας εκτιμάται σε $240\mu\text{Sv}$.

14.11. ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΓΗΣ

Τα ραδιονουκλίδια τα οποία υπάρχουν φυσικώς στη Γη, ανήκουν σε δυο κατηγορίες: τα κοσμογενή και τα πρωτογενή. Τα κοσμογενή αναφέρθηκαν στη προηγούμενη παράγραφο και συμμετέχουν ελάχιστα στη δόση. Τα πρωτογενή ραδιονουκλίδια είναι κυρίως ^{40}K , ^{87}Rb και τα στοιχεία των φυσικών ραδιενεργών σειρών ^{238}U , ^{239}U , ^{232}Th .

Το νουκλίδιο ^{238}U διασπάται αυτόματα με εκπομπή νετρονίου με αποτέλεσμα στο εσωτερικό της Γης να υπάρχουν μεγάλες ποσότητες προϊόντων σχάσεως. Σαν παράδειγμα η ενεργότητα του ^{90}Sr στο εσωτερικό της Γης υπολογίζεται σε $2 \times 10^{-6} \text{ Bq/kg}^{-1}$ προκαλώντας δόση 10^{-11} Gy στον ερυθρό μυελό των οστών, δηλαδή ασήμαντη. Από μετρήσεις, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε διάφορες χώρες, προκύπτει σαν διάμεσος ρυθμός απορροφούμενης δόσης στον αέρα: 5 InGy h^{-1} .

Η σχετική συμμετοχή του ^{40}K , της σειράς του ^{238}U και της σειράς του ^{232}Th στον παραπάνω ρυθμό δόσης είναι περίπου 33%, 32% και 35%, ενώ η αντίστοιχη διάμεσος τιμή συγκεντρώσεως τους στο έδαφος είναι $400,25$ και 30 Bq/kg^{-1} .

Υπάρχουν όμως περιοχές με πετρώματα ιδιαίτερος πλούσια σε φυσικά ραδιονουκλίδια με ρυθμό δόσης μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από την παραπάνω. Περιοχή με υψηλό ρυθμό είναι η Κεραλάτων Ινδιών με μέσο ρυθμό 1800 nGy h^{-1} .

Είναι προφανές ότι και οι οικίες αποτελούν χώρους ακτινοβόλησης λόγω των ραδιονουκλιδίων που υπάρχουν στα δομικά υλικά. Για την Ευρώπη υπολογίζεται ότι ο λόγος του ρυθμού δόσης μέσα στα κτίρια προς εκείνον στην ύπαιθρο έχει τιμές 1,35 για κατασκευές από τούβλα και 1,48 για κατασκευές από μπετόν.

14.12. ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗ (ΡΑΔΟΝΙΟ)

Τα ραδιονουκλίδια που υπάρχουν στο περιβάλλον εισέρχονται στο ανθρώπινο σώμα δια της εισπνοής και της κατάποσης. Τα κοσμογενή ραδιονουκλίδια συμβάλλουν πολύ λίγο στην ακτινοβολήση του ανθρώπου. Από αυτά, τα ραδιονουκλίδια που κυρίως ενδιαφέρουν είναι τα ${}^2\text{H}$, ${}^7\text{Be}$, ${}^{14}\text{C}$ και ${}^{22}\text{Na}$.

Από τα πρωτογενή ραδιονουκλίδια ενδιαφέρουν το ${}^{40}\text{K}$, το ${}^{87}\text{Rb}$ και ραδιονουκλίδια, τα οποία ανήκουν στις φυσικές σειρές του ${}^{238}\text{U}$ και του ${}^{232}\text{Th}$.

Το κάλιο είναι βασικό στοιχείο για την ανθρώπινη ζωή και υπόκειται σε ομοιοστατικό έλεγχο μέσα στο ανθρώπινο σώμα. Η μέση περιεκτικότητα σε κάλιο είναι 2g ανά kg βάρους σώματος. Ο λόγος του ${}^{40}\text{K}$ προς τα άλλα ισότοπα του καλίου είναι $1,8 \times 10^{-4}$ και η μέση ραδιενεργός συγκέντρωση 60Bq/kg^{-1} σώματος. Η υψηλότερη ανά κάτοικο δόση απορροφάται στον ερυθρό μυελό των οστών και είναι κατά μέσο όρο $270\mu\text{Gy}$ ετησίως. Η ετήσια ενεργός δόση λόγω του ${}^{40}\text{K}$ υπολογίζεται σε $0,17\text{mSv}$.

Από τα ραδιενεργά μέλη της σειράς του ${}^{238}\text{U}$, ενδιαφέρον παρουσιάζουν το ${}^{226}\text{Ra}$, το θυγατρικό του ${}^{222}\text{Rn}$ και τα θυγατρικά του ${}^{222}\text{Rn}$. Τέλος, από τη σειρά ${}^{232}\text{Th}$ ενδιαφέρει το ${}^{220}\text{Rn}$ ή θόρον Tn.

Το ${}^{226}\text{Ra}$ με χρόνο φυσικού υποδιπλασιασμού 1620 έτη εισέρχεται στον οργανισμό κυρίως με την κατάποση. Ο μεταβολισμός του είναι παρόμοιος του Ca με αποτέλεσμα το 70%-90% του ${}^{226}\text{Ra}$ να εναποτίθεται στα οστά ενώ το υπόλοιπο κατανέμεται στους μαλακούς ιστούς. Με την κατάποση, σε περιοχές με κανονική συγκέντρωση φυσικών ραδιονουκλιδίων εισέρχονται στον οργανισμό περίπου 15Bq ${}^{226}\text{Ra}$ ανά έτος ενώ με την εισπνοή μόνο $0,01\text{Bq}$. Με τις ανωτέρω επιβαρύνσεις η ετήσια ενεργός δόση εκτιμάται σε $7\mu\text{Sv}$.

Το ${}^{222}\text{Rn}$ με $T_{1/2}=3,82$ ημέρες είναι θυγατρικό του ${}^{226}\text{Ra}$ και από αυτό ξεκινούν τα μέλη της σειράς: ${}^{214}\text{Po}$ (3,05min), ${}^{214}\text{Pb}$ (26,8min), ${}^{214}\text{Bi}$ (19,7min), ${}^{214}\text{Po}$ (164 μs), ${}^{210}\text{Pb}$ (22,3min), ${}^{210}\text{Bi}$ (5,01d), ${}^{210}\text{Po}$ (138,4d), ${}^{206}\text{Pb}$.

Το ${}^{220}\text{Rn}$ ή Tn με $T_{1/2} = 55\text{s}$ προέρχεται από το ${}^{224}\text{Ra}$ (3,66d) και από αυτό ξεκινούν τα μέλη της σειράς, ${}^{216}\text{Po}$ (0,15s), ${}^{215}\text{Pb}$ (10,64h), ${}^{212}\text{Bi}$ (60,6min), ${}^{212}\text{Po}$ (304ns), ${}^{208}\text{Pb}$.

Το σημαντικό για τα μέλη των ανωτέρω σειρών είναι ότι διασπώνται κυρίως με α διάσπαση και τα σωματίδια α όταν βρίσκονται εντός του σώματος έχουν υψηλό RBE.

Ο άνθρωπος πάντοτε ακτινοβολείται από τα ραδόνια και τα θυγατρικά τους. Το ραδόνιο και το θόρον υπάρχουν σχεδόν παντού, διότι διαχέονται μέσω του εδάφους και των οικοδομικών υλικών στον ατμοσφαιρικό αέρα. Το ραδόνιο μετράται σε Bq ανά Litro ατμοσφαιρικού αέρα. Παλαιότερα μετριόνταν σε 1 pCi/L. 1 pCi είναι ισοδύναμο με $0,037\text{Bq}$ και αντιστοιχεί σε 2,2 διασπώμενους πυρήνες ραδονίου ανά min ανά Litro αέρα. Επειδή έχει σημασία η πραγματική συγκέντρωση των ραδιονουκλιδίων που εκπέμπουν α σωματίδια και η δυνατότητα να δημιουργηθούν και άλλα κατά τις μελλοντικές διασπάσεις, ο ρυθμός έκθεσης στο ραδόνιο εκφράζεται στη δυνητική συγκέντρωση ενέργειας α(PAEC) με μονάδα το Jm^{-3} ή το επίπεδο εργασίας- working level (WL). 1WL προϊόντων διασπάσεως Rn αντιστοιχεί περίπου στη ποσότητα των προϊόντων διασπάσεων που απελευθερώνονται από $7,4\text{Bq/L}$ (200 pCi σε 1Litro αέρα). Ο ακριβής ορισμός του WL είναι η συγκέντρωση των θυγατρικών του Rn, τα οποία ελευθερώνουν ενέργεια $1,3 \times 10^5$ MeV ανά Litro αέρα.

14.13. ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗΣ ΑΠΟ ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΛΟΓΩ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες ο άνθρωπος βρίσκεται σε περιβάλλον με αυξημένη ενεργότητα φυσικών πηγών ακτινοβολίας, λόγω των μετατροπών που έχει επιφέρει στο περιβάλλον ή της τεχνολογίας που χρησιμοποιεί. Σαν παραδείγματα αναφέρουμε τα αεροπορικά και διαστημικά ταξίδια με τα οποία αυξάνει η έκθεση στην κοσμική ακτινοβολία, τη πηγή ενέργειας τον άνθρακα και η χρήση φυσικού αερίου.

Ο άνθρακας, όπως και τα περισσότερα υλικά στη φύση περιέχει ποσότητες των πρωτογενών ραδιονουκλιδίων της Γης. Κατά συνέπεια, η καύση του άνθρακα απελευθερώνει στο περιβάλλον φυσική ραδιενέργεια, η οποία υπήρχε στο βάθος του εδάφους, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της ακτινοβολίας υποστρώματος και την έκθεση πληθυσμών σε ακτινοβολία. Η ενεργότητα των διαφόρων φυσικών ραδιονουκλιδίων που περιέχεται στον άνθρακα εξαρτάται από την περιοχή και το είδος του άνθρακα. Γενικά, η περιεκτικότητα του άνθρακα σε ραδιονουκλίδια είναι μικρότερη εκείνης του εσωτερικού της Γης. Σε μερικές περιπτώσεις όμως το ανωτέρω δεν ισχύει λόγω σεισμικών μεταβολών των εδαφικών στρωμάτων, οπότε βρίσκονται κοιτάσματα με υψηλή περιεκτικότητα ραδιονουκλιδίων, κυρίως ουρανίου.

Μέσες τιμές συγκέντρωσης των ραδιονουκλιδίων λαμβάνονται τα 50Bq/kg^{-1} και για το ^{40}K και το 20Bq/kg^{-1} για το καθένα από τα ^{232}U και ^{232}Th .

Κατά την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, ο άνθρακας καίγεται σε κλίβανο θερμοκρασίας 1800°C . Κατάλοιπο της καύσης είναι η τέφρα, μέρος της οποίας πέφτει στον πυθμένα του κλίβανου. Υπάρχει όμως και ένα τμήμα τέφρας αρκετά ελαφριάς ώστε να ίπταται. Αυτή η πτητική τέφρα μαζί με θερμά αέρια και άλλα πτητικά στερεά φτάνει στην καμινάδα της εγκατάστασης και ανάλογα με την αποτελεσματικότητα των συστημάτων κατακράτησης ένα τμήμα της διαφεύγει στην ατμόσφαιρα. Η περιεκτικότητα της τέφρας σε φυσικά ραδιονουκλίδια είναι με πολύ αδρή προσέγγιση μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από εκείνη του άνθρακα διότι μετά την καύση εξαφανίζονται τα οργανικά συστατικά του. Στις περισσότερες ανεπτυγμένες χώρες καταβάλλεται κάθε προσπάθεια ώστε η διαφυγή στάχτης στην ατμόσφαιρα να είναι μικρότερη του 1% της συνολικής τέφρας, η οποία παράγεται. Υπάρχουν όμως χώρες, όπως η Πολωνία και η Ινδία, στις οποίες διαφεύγει στην ατμόσφαιρα το 20% και 10% της τέφρας, αντίστοιχα. Μέσες τιμές ενεργότητας των ραδιονουκλιδίων που διαφεύγουν στον ατμοσφαιρικό αέρα μέσω της τέφρας λαμβάνονται σε MBq ανά παραγόμενη ενέργεια 1GW 4000 για το ^{40}K , τα 1500 για το ^{238}U και τα θυγατρικά του έως το ^{226}Ra , τα 5000 για το ^{210}Pb και το ^{210}Po , και τα 1500 για το ^{232}Th και τα θυγατρικά του έως το ^{224}Ra . Τα ραδόνια ^{222}Rn και ^{220}Rn δε συγκρατούνται από τα συστήματα κατακράτησης και διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα. Η ενεργότητα του διαφεύγοντος ραδονίου εκτιμάται σε 60GBq ανά GW παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται εγχώριοι λιγνίτες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι λιγνίτες της Ελλάδας χαρακτηρίζονται από την υψηλή περιεκτικότητα τους σε ραδιονουκλίδια των φυσικών στερεών και από το υψηλό υπόλειμμα τέφρας που έχουν. Επομένως, ειδικώς για την Ελλάδα η τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να μεριμνά για ποσοστό πτητικής τέφρας $<1\%$.

Η συλλογική δράση ανά GW παραγόμενης ενέργειας από άνθρακα εκτιμάται σε $200 \cdot 10^{-2} \text{manSv/GW}$.

Άλλη πηγή μεταφοράς φυσικών ραδιονουκλιδίων στο περιβάλλον είναι η χρήση φωσφορούχων πετρωμάτων για την παραγωγή λιπασμάτων. Η συλλογική δόση από την εκμετάλλευση των φωσφορούχων πετρωμάτων εκτιμάται σε $3 \cdot 10^5 \text{manSv}$.

Παράδειγμα αύξησης της δόσης λόγω χρήσης της τεχνολογίας αποτελούν τα αεροπορικά και διαστημικά ταξίδια. Υποθέτοντας ένα μέσο ύψος πτήσης 8km για τα

αεροπορικά ταξίδια, ο μέσος ρυθμός δόσης είναι $0,84 \mu\text{Gy h}^{-1}$ ο μέσος ρυθμός ισοδύναμου δόσης είναι $1,35 \mu\text{Sv h}^{-1}$ και το συλλογικό ενεργό ισοδύναμο δόσης για τους κατοίκους της γης είναι περίπου 3000 manSv.

Υπάρχουν πολλά παραδείγματα πηγών ακτινοβολίας που οφείλονται σε εφαρμογές τους στον καθημερινό βίο. Οι θόνες των έγχρωμων τηλεοράσεων, τα μηχανήματα ελέγχου αποσκευών με ακτίνες X, ανιχνευτές καπνού που χρησιμοποιούν ραδιονουκλίδιο, διάφορα υλικά που χρησιμοποιούνται σε κεραμικά, όπως κράματα ουρανίου ή θορίου, τέλος ρολόγια με ραδιοφθορίζοντες δείκτες ή αριθμούς. Η μέση ετήσια ενεργός ισοδύναμη δόση ανά κάτοικο από αυτές τις πηγές υπολογίζεται σε $10 \mu\text{Sv}$.

14.14. ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗ ΑΠΟ ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΠΗΓΕΣ

Η επιστήμη και η τεχνολογία έχουν κατασκευάσει τεχνητές πηγές ιοντιζουσών ακτινοβολιών των οποίων η χρήση είναι συνεχώς αυξανόμενη. Στις πηγές αυτές ανήκουν οι πηγές που χρησιμοποιούνται στην Ιατρική και ειδικότερα στην Ακτινοδιαγνωστική, στην Ακτινοθεραπεία και στην Πυρηνική Ιατρική. Επίσης, οι πηγές που οφείλονται στην τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την πυρηνική αντίδραση της σχάσεως, οι πυρηνικοί αντιδραστήρες ερευνητικού τύπου, οι επιταχυντικές διατάξεις της Φυσικής Υψηλών Ενεργειών και άλλες πηγές σε βιομηχανικές ή επιστημονικές εφαρμογές μικρότερης κλίμακας.

Σε πολλές χώρες η ακτινοβολία των κατοίκων για ιατρικούς σκοπούς αποτελεί την σπουδαιότερη αιτία ακτινοβολίας από τεχνητές πηγές σε μερικές μάλιστα η μέση δόση ανά κάτοικο πλησιάζει την δόση από φυσικές πηγές ακτινοβολίας. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι διαγνωστικές ιατρικές εφαρμογές με ιοντίζουσες ακτινοβολίες προς τις θεραπευτικές τους εφαρμογές, έχουν ένα λόγο 450:1.

14.15. ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΕΣ ΙΑΤΡΙΚΕΣ ΕΞΕΤΑΣΕΙΣ ΜΕ ΑΚΤΙΝΕΣ X

Σύμφωνα με δεδομένα του ΟΗΕ, για τις χώρες επιπέδου Υγείας I, στις οποίες ανήκει και η Ελλάδα και για το χρονικό διάστημα 1993-1996, η συχνότητα των πραγματοποιούμενων διαγνωστικών εξετάσεων με ακτίνες X από χώρα σε χώρα ποικίλει από 151 σε 1477 ανά 1000 κατοίκους, με μια σταθμισμένη ως προς τον πληθυσμό μέση τιμή για όλες τις χώρες επιπέδου I, τις 920 διαγνωστικές εξετάσεις ανά 1000 κατοίκους ανά έτος έναντι 887 που είχε οριστεί για το χρονικό διάστημα 1985-90.

Οι δόσεις στους ασθενείς ποικίλουν ανάλογα με την εξέταση, την τεχνική και την ποιότητα του εξοπλισμού. Ανάλογα με την εξέταση οι ενεργές δόσεις ποικίλουν από $0,06 \text{ mSv}$ για τα άκρα ως 22 mSv για την PTCA. Σε ορισμένες εξετάσεις της καρδιάς η δόση εισόδου στον ασθενή μπορεί να φτάσει αρκετά Gy. Η μέση ενεργός δόση ανά ακτινοδιαγνωστική εξέταση για το χρονικό διάστημα 1991-96 υπολογίστηκε σε $1,3 \text{ mSv}$ για τις χώρες επιπέδου Υγείας I, έναντι $1,05 \text{ mSv}$ για το χρονικό διάστημα 1985-90, ενώ σε παγκόσμιο επίπεδο $1,2 \text{ mSv}$ έναντι 1 mSv για το χρονικό διάστημα 1985-90.

Η ενεργός δόση ανά κάτοικο από τις διαγνωστικές ιατρικές εφαρμογές της ακτινοβολίας X αριθμητικά ισούται με την ενεργό δόση από το φυσικό ραδόνιο και αυξάνει κατά 50% την ακτινοβολία των κατοίκων από τις φυσικές πηγές ακτινοβολίας. .

Για την Ελλάδα υπάρχουν μελέτες δοσιμετρίας για κάποιες από τις ακτινοδιαγνωστικές εξετάσεις. Ενδεικτικά αναφέρονται: $0,2 \text{ mSv}$ ως ενεργός δόση στη

μαστογραφία, 20,9 mSv στη στεφανιογραφία, 23,2 mSv στην ΡΤCΑστις δε εξετάσεις του ΓΕΣ με χρήση βαριούχου γεύματος οι δόσεις ήταν 8,6 mSv και βαριούχου υποκλυσμού: 24 mSv.

14.16. ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΕΣ ΕΞΕΤΑΣΕΙΣ ΜΕ ΡΑΔΙΟΦΑΡΜΑΚΑ.

Στη διαγνωστική Πυρηνική Ιατρική τα δύο σπουδαιότερα ραδιονουκλίδια είναι το ^{99m}Tc και το ^{131}I . Η χρήση του ^{99m}Tc αυξάνει ενώ του ^{131}I ελαττώνεται. Στις χώρες με επίπεδο Υγείας I αντιστοιχούσαν για το χρονικό διάστημα 1991-1996 19 διαγνωστικές εξετάσεις Πυρηνικής Ιατρικής ανά 1000 κατοίκους ανά έτος. Σε παγκόσμιο επίπεδο ήταν 5,6 εξετάσεις ανά 1000 κατοίκους έναντι 4,5 για το χρονικό διάστημα 1985-90. Η μέση ενεργός δόση στον ασθενή ανά εξέταση για τις χώρες επιπέδου Υγείας I ήταν για το χρονικό διάστημα 1991-1996 4.8 mSv, ενώ σε παγκόσμιο επίπεδο η μέση ενεργός δόση ανά εξέταση υπολογίζεται σε 4.3 mSv. Η μέση ετήσια ενεργός δόση ανά κάτοικο ήταν 0.081mSv για τις χώρες επιπέδου Υγείας I και 0.03 mSv παγκοσμίως.

Οι εξετάσεις με συστήματα PET/CT δεν έχουν ακόμη αξιολογηθεί πλήρως. Πάντως η ενεργός δόση ασθενούς για εξέταση PET/CT υπολογίσθηκε προσφάτως σε 25 mSv εκ των οποίων τα 18mSv οφείλονται στο CT και τα 7mSv στο PET. Μέση ενεργός δόση σε ασθενή ανά είδος εξέτασης με ακτίνες X σε mSv για το χρονικό διάστημα 1991-1996.

14.17. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΩΝ ΔΟΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΗΣ ΧΡΗΣΕΩΣ ΤΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ ΣΤΗΝ ΙΑΤΡΙΚΗ.

Συμπεραίνεται ότι η ιατρική ακτινοβολία στις χώρες επιπέδου Υγείας I αυξάνει περίπου κατά 54% την ενεργό δόση από τις φυσικές πηγές ακτινοβολίας (ΠΙν.5) με τις διαγνωστικές ακτίνες X να ευθύνονται για το 92% αυτής της δόσης.

Ιατρική εφαρμογή	Ενεργός Δόση (mSv)
Χώρες επιπέδου Υγείας I	
Ιατρικές ακτίνες X	1,2
Οδοντιατρικές ακτίνες X	0,01
Πυρηνική Ιατρική	0,08
Άθροισμα	1,3

Πίνακας 21: Ενεργός δόση ανά κάτοικο Χώρας από διαγνωστικές ιατρικές εφαρμογές

14.18. ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ-ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ

Ø Δόσεις οφειλόμενες στις δοκιμές πυρηνικών όπλων στην ατμόσφαιρα

Η έκρηξη πυρηνικού όπλου στην ατμόσφαιρα έχει σαν αποτέλεσμα και την απελευθέρωση ραδιονουκλιδίων σαν προϊόντα της σχάσεως. Τα ραδιονουκλίδια αυτά είναι κυρίως το ^3H , ^{14}C , ^{54}Mn , ^{55}Fe , ^{85}Kr , ^{90}Sr , ^{89}Sr , ^{106}Ru , ^{131}I , ^{137}Cs , ^{136}Cs , ^{144}Ba , ^{144}Ce , πλουτόνιο και υπερουράνια στοιχεία. Από τα ανωτέρω μεγαλύτερη σημασία από άποψη

βιολογική έχουν το ^{90}Sr , το ^{137}Cs , το πλουτόνιο και τα υπερουράνια στοιχεία. Μετά την έκρηξη του πυρηνικού όπλου εκτινάσσονται στην ατμόσφαιρα κονιορτοί, σωματίδια υπό την γενική ονομασία αεροζόλ επί των οποίων μεταφέρονται οι ραδιενεργοί πυρήνες. Το ραδιενεργό αυτό νέφος ακτινοβολεί τον ανθρώπινο οργανισμό κατά την μετακίνησή του, τόσο εξωτερικά όσο και εσωτερικά δια της εισπνοής ραδιενεργού ατμοσφαιρικού αέρα. Τα σωματίδια που το αποτελούν πέφτουν στην επιφάνεια της γης ανάλογα με το μέγεθος τους και τις κλιματολογικές συνθήκες. Το φαινόμενο ονομάζεται ραδιενεργός επίπτωση (fallout). Η επιφάνεια της Γης καθίσταται ραδιενεργός, με αποτέλεσμα την εξωτερική ακτινοβολία του οργανισμού και την εσωτερική ακτινοβολία μέσω της τροφικής αλυσίδας.

Η εκρηκτική ισχύς των πυρηνικών όπλων υπολογίζεται συγκριτικά με την εκρηκτική ισχύ ποσότητας συμβατικής εκρηκτικής ύλης του TNT (τρινιτροτουλόλη). Προφανώς δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία της ισχύος των δοκιμασθέντων πυρηνικών όπλων. Το συλλογικό ενεργό ισοδύναμο δόσης μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 80 υπολογίζεται σε $3 \times 10^7 \text{manSv}$, που ισοδυναμεί με έκθεση του πληθυσμού της Γης επί 4 έτη στη φυσική ακτινοβολία. Το μέσο ανά κάτοικο ισοδύναμο δόσης υπολογίζεται σε 4mSv .

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι δόσεις από τις δοκιμές των πυρηνικών όπλων υπολογίστηκαν κυρίως στις δοκιμές της περιόδου 1950-1970. Οι συνθήκες απαγόρευσης των δοκιμών στην ατμόσφαιρα και γενικότερα οι νέες διαμορφούμενες καταστάσεις στο χώρο των Κρατών-πυρηνικών δυνάμεων θα μεταβάλλουν την επιβάρυνση του πλανήτη μας από αυτή την πηγή ακτινοβολίας προς το καλύτερο.

Ø *Δόσεις οφειλόμενες στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνικούς σταθμούς*

Σήμερα στον πλανήτη μας λειτουργούν περί τους 430 πυρηνικοί αντιδραστήρες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχουν χώρες στις οποίες ένα μεγάλο ποσοστό της ηλεκτρικής τους ενέργειας προέρχεται από πυρηνικούς αντιδραστήρες. Τέτοιες χώρες είναι η Γαλλία (65%), το Βέλγιο (60%), η Ελβετία (40%), η Σουηδία (42%), η Γερμανία (43%), η Ταιβάν (53%) και η Φιλανδία (38%). Πρέπει να σημειωθεί ότι μέχρι το τελικό στάδιο της παραγωγής του ηλεκτρικού ρεύματος όπως και κατά την λειτουργία των πυρηνικών αντιδραστήρων μεσολαβούν διάφορα στάδια τα καθένα από τα οποία μπορεί να οδηγήσει σε ακτινοβολία. Τα στάδια αυτά είναι η εξόρυξη των ορυκτών του ουρανίου, η μετατροπή του σε διάφορες χημικές μορφές, ο εμπλουτισμός του σε αρκετές περιπτώσεις σε ^{235}U , η κατασκευή των στοιχείων του πυρηνικού καυσίμου, η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, η επαναεπεξεργασία των ραδιενεργών στοιχείων καυσίμου, η μεταφορά των διαφόρων ραδιενεργών υλικών στα διάφορα στάδια και τέλος η εναποθήκευση των υγρών και στερεών ραδιενεργών καταλοίπων.

Από όλο το παραπάνω κύκλο των πυρηνικών καυσίμων υπολογίζεται ότι ο μέσος κάτοικος του πλανήτη μας προσλαμβάνει ετησίως δόση $1 \mu\text{Sv}$, δηλαδή δόση ίση με το 0.05% εκείνης που προέρχεται από τις φυσικές πηγές ακτινοβολίας. Η ανωτέρω τιμή είναι η πολύ μικρή αλλά ισχύει με την προϋπόθεση να μη συμβεί μείζον πυρηνικό ατύχημα όπως εκείνο στο Chernobyl στη Σοβιετική Ένωση το 1986.

14.19. ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ

Πρωταρχικός σκοπός της Ακτινοπροστασίας, σύμφωνα με την ICRP (2007) κατά τη χρήση των ιοντιζουσών ακτινοβολιών είναι «να παρέχει ένα κατάλληλο επίπεδο προστασίας για τον άνθρωπο χωρίς να περιορίζει άκριτα τις ωφέλιμες δραστηριότητες που προκαλούν έκθεση σε ακτινοβολίες. Ο σκοπός αυτός δεν επιτυγχάνεται στηριζόμενος μόνο σε επιστημονικές ιδέες. Όλοι οι εμπλεκόμενοι με την Ακτινοπροστασία πρέπει να προβαίνουν σε εμπειριστατωμένες κρίσεις σε ότι αφορά τη σχετική σημασία των διαφόρων ειδών κινδύνων

και τη στάθμιση των κινδύνων και ωφελειών. Με αυτόν τον τρόπο δεν υπάρχει διαφορά με εκείνους που εργάζονται για τον έλεγχο των κινδύνων σε άλλα πεδία της ανθρώπινης δραστηριότητας».

Την Ακτινοπροστασία, εκτός από την περίπτωση εκθέσεων ατόμων σε υψηλές δόσεις (ακτινικό ατύχημα), την ενδιαφέρει και η επί καθημερινής βάσεως έκθεση σε χαμηλές δόσεις και χαμηλούς ρυθμούς δόσεων. Η ICRP σαν χαμηλή δόση ορίζει δόση $< 0.2\text{Gy}$ (20 rad) και σαν χαμηλό ρυθμό δόσης το ρυθμό $< 0.1\text{ Gy/h}$ (10 rad/h). Η UNSCEAR σαν χαμηλή δόση λαμβάνει δόση από εφάπαξ έκθεση $< 0.2\text{ Gy}$, ενώ σαν χαμηλό ρυθμό ορίζει ρυθμό $< 0.1\text{ mGy/min}$ (10 mrad/min) σαν μέση τιμή από έκθεση σε ακτινοβολίες σε διάρκεια 1h

14.20. ΈΝΝΟΙΕΣ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Στους σύγχρονους κανονισμούς και συστάσεις Ακτινοπροστασίας, υπάρχουν έννοιες και όροι που καταβάλλεται προσπάθεια να ορισθούν κατωτέρω.

- **Έκθεση:** Η διαδικασία που καταλήγει σε έκθεση ατόμου ή ατόμων σε ιοντίζουσα ακτινοβολία ή ραδιενεργά υλικά. Αποτέλεσμα της έκθεσης μπορεί να είναι η πρόσληψη απορροφούμενης δόσης από ολόκληρο το σώμα ή από τμήματα του.
Η έκθεση για τα άτομα ενός πληθυσμού διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες: α) Επαγγελματική έκθεση, αφορά έκθεση που συμβαίνει, στον χώρο εργασίας και κυρίως λόγω του είδους της εργασίας των εκτιθέμενων ατόμων. β) Ιατρική έκθεση, είναι έκθεση που οφείλεται σε ιατρικές διαγνωστικές ή θεραπευτικές εφαρμογές των ακτινοβολιών. γ) Έκθεση του κοινού, περιλαμβάνει όλες τις άλλες εκθέσεις πλην της επαγγελματικής και της ιατρικής.
Πρέπει να σημειωθεί ότι οι εκθέσεις διαφόρων κατηγοριών δεν προστίθενται ακόμη και στην περίπτωση που το αυτό άτομο υπόκειται σε έκθεση από διάφορες κατηγορίες.
- **Πηγή:** Η αιτία της έκθεσης ατόμου ή ατόμων σε ιοντίζουσα ακτινοβολία. Δεν αφορά μόνο την πηγή της ακτινοβολίας σαν οριζόμενη φυσική οντότητα όπως μία λυχνία παραγωγής ακτινοβολίας X ή ένα φιαλίδιο με ραδιενεργό υλικό, αλλά κατά περίπτωση ολόκληρη την οδό έκθεσης σε ακτινοβολία. Σαν παράδειγμα σε περίπτωση διαφυγής ραδιενεργού υλικού πηγή μπορεί να είναι ολόκληρη η εγκατάσταση, τα διαφυγόντα υλικά ή και τα δύο.
- **Μονήρης (ή διακριτή) πηγή:** Πηγή ιοντίζουσας ακτινοβολίας η οποία λαμβάνεται σαν ξεχωριστή μονάδα και η οποία ακτινοβολεί ή μπορεί να ακτινοβολήσει άτομα. Κατά την (ορθή) κρίση των υπευθύνων Ακτινοπροστασίας και κατά περίπτωση, παραδείγματα μονίμων πηγών μπορεί να είναι ένας πυρηνικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ένας κάδος με ραδιενεργά απορρίμματα, μία λυχνία παραγωγής ακτινοβολίας X, ένα ιατρικό Ακτινοδιαγνωστικό τμήμα, μια σύριγγα με ρφ ή ένας ασθενής στον οποίο έχει χορηγηθεί ραδιενεργός ουσία.
- **Περιορισμός δόσης:** Το πλέον θεμελιώδες επίπεδο προστασίας αναφερόμενο σε αναγκαστικό περιορισμό της δόσης από διακριτή πηγή ακτινοβολίας στα πλέον εκτιθέμενα άτομα σε αυτήν. Η ακτινοβολία είναι σχεδιασμένη και δεν περιλαμβάνει την ιατρική έκθεση.
- **Επίπεδα αναφοράς:** Σε καταστάσεις ανάγκης ή σε υπάρχουσες ελεγχόμενες καταστάσεις έκθεσης, τα επίπεδα αναφοράς αναπαριστούν το επίπεδο της δόσης ή της επικινδυνότητας, υπεράνω του οποίου φαίνεται ότι δεν είναι σωστό να

επιτρέπεται η πραγματοποίηση της έκθεσης και επομένως πρέπει να σχεδιάζονται βελτιστοποιημένα μέτρα ακτινοπροστασίας.

- **Όριο δόσης:** Επίπεδο δόσης προστασίας που αναφέρεται στη δόση από το σύνολο των πηγών που ακτινοβολούν κάποιο άτομο συγκεκριμένης κατηγορίας έκθεσης.
- **Πρακτική:** Αναφέρεται σε εκείνες της πηγές που οφείλονται σε ανθρώπινες δραστηριότητες, οι οποίες εφαρμόζονται ή διατηρούνται εσκεμμένα και ως εκ τούτου αυξάνουν ή μπορεί να αυξήσουν την έκθεση ατόμων ή τον αριθμό των ατόμων που εκτίθενται.
- **Βλάβη:** Για την Ακτινοπροστασία σαν βλάβη λαμβάνεται η βλάβη υγείας.

14.21. ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Οι σύγχρονες αρχές Ακτινοπροστασίας στηρίζονται στο διαχωρισμό των βιολογικών αποτελεσμάτων των ακτινοβολιών σε δύο κατηγορίες, σε εκείνα που οφείλονται στα καθορισμένα (ή αντιδράσεις ιστών) και στα στοχαστικά αποτελέσματα δηλαδή καρκινογένεσεις. Ειδική περίπτωση των στοχαστικών αποτελεσμάτων είναι τα ονομαζόμενα κληρονομικά.

Ο πρωταρχικός σκοπός της Ακτινοπροστασίας επιτυγχάνεται εφόσον αυτή κατορθώνει να απαγορεύει την εμφάνιση των καθορισμένων αποτελεσμάτων και να ελέγχει την πιθανότητα εμφάνισης των στοχαστικών, ώστε να επιτυγχάνεται επιθυμητό επίπεδο Ακτινοπροστασίας.

14.22. ΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ Η ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΙΣΤΩΝ

Για τους σκοπούς της Ακτινοπροστασίας στην περιοχή δόσης λίγων mGy ή λίγων δεκάδων mGy δεν αναμένονται βιολογικά αποτελέσματα αυτής της κατηγορίας. Το εφαρμοζόμενο σύστημα Ακτινοπροστασίας στηρίζει τις αποφάσεις του για την επιλογή μέτρων αποφυγής των καθορισμένων αποτελεσμάτων, στις προτεινόμενες από την ICRP δόσεις κατωφλίου για 1% εισαγωγή καθορισμένων αποτελεσμάτων ή θανάτου λόγω ακτινοβόλησης. Οι μικρότερες τιμές δόσεων κατωφλίου είναι τα 0.1Gy για την εμφάνιση προσωρινής στειρότητας στους όρχεις και 0.5Gy στον μυελό των οστών για την εμφάνιση αναστολής της αιμοποίησης.

14.23. ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗ ΕΜΒΡΥΩΝ

Τα ακτινοβιολογικά δεδομένα ενισχύουν την άποψη ότι η ακτινοευαισθησία των εμβρύων στην μήτρα είναι μέγιστη κατά τη διάρκεια της μέγιστης οργανογένεσης.

Ακτινοβιολογικά δεδομένα επί ζώων δείχνουν ότι υπάρχει κατώφλιο δόσης γύρω στα 100 mGy για την εμφάνιση ανωμαλιών στην ανάπτυξη. Επομένως ο κίνδυνος από ακτινοβόληση του εμβρύου κατά τη διάρκεια της ενδομήτριου ζωής του για δόσεις λίγων δεκάδων mGy μπορεί πρακτικά να αγνοηθεί.

Τα δεδομένα από τη μελέτη LSS δείχνουν την ύπαρξη κατωφλίου δόσης το λιγότερο 300 mGy προσλαμβανόμενης από το έμβρυο στην περισσότερο ευαίσθητη περίοδο των 8-15 εβδομάδων μετά τη σύλληψη, για την εμφάνιση σοβαρής διανοητικής καθυστέρησης.

Και στην περίπτωση της παρατεταμένης ενδομήτριας έκθεσης του εμβρύου, δε δημιουργείται ιδιαίτερο πρόβλημα Ακτινοπροστασίας εφόσον η δόση είναι αρκετά χαμηλότερη των 100 mGy.

14.24. Ο ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΔΟΣΕΩΝ

Το επίπεδο προστασίας που συστήνεται στους Κανονισμούς Ακτινοπροστασίας για τα άτομα πρέπει να εκλαμβάνεται ως υποχρεωτικό και ή μη διατήρηση αυτού του επιπέδου σημαίνει αποτυχία εφαρμογής του συστήματος.

Το πλέον βασικό επίπεδο προστασίας αναφέρεται στην δόση που προέρχεται από διακριτή πηγή ακτινοβολίας και ονομάζεται περιορισμός δόσης. Χρησιμοποιείται για να παρέχει ένα επίπεδο προστασίας στα περισσότερα εκτιθέμενα άτομα από την διακριτή πηγή. Οι περιορισμοί δόσης αφορούν όλες τις περιπτώσεις έκθεσης σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες ήτοι κανονική κατάσταση, ατύχημα και κατάσταση ανάγκης όπως και ελεγχόμενη έκθεση. Δεν συμπεριλαμβάνεται η έκθεση του ασθενούς.

Οι περιορισμοί δόσης παραστούν το επίπεδο δόσης πάνω από το οποίο δικαιολογείται η έναρξη ενεργειών για την αποσόβηση της έκθεσης και την ελάττωση των δόσεων.

Η βελτιστοποίηση της διαδικασίας προστασίας έναντι κάθε συγκεκριμένης πηγής πρέπει να στηρίζεται στην αρχή ALARA δηλαδή ότι όλες οι εκθέσεις πρέπει να είναι «τόσο χαμηλές όσο λογικά είναι εφικτό λαμβανομένων υπόψη των επικρατουσών οικονομικών και κοινωνικών συνθηκών».

Η προηγούμενη απαίτηση δεν είναι δυνατό να εκφρασθεί σε γενικούς ποσοτικούς όρους. Αυτοί καθορίζονται για κάθε πηγή από τις αρχές κάθε χώρας. Ποσοτικά καθορίζονται οι μέγιστες τιμές περιορισμού δόσης. Οι ακριβείς περιορισμοί δόσεων που σχετίζονται με τις μονήρεις πηγές είναι θέμα καθορισμού τους από τις αρμόδιες αρχές.

Η αποτελεσματικότερη προσέγγιση για την εκτίμηση και αντιμετώπιση της έκθεσης του κοινού είναι η επιλογή μιας αντιπροσωπευτικής μονήρους πηγής ή μιας ομάδας πηγών και η εκτίμηση της δόσης που επιφέρουν στο περισσότερο εκτεθειμένο άτομο από το κοινό ή στην περισσότερο εκτεθειμένη ομάδα του κοινού ή αλλιώς την κρίσιμη ομάδα και η εφαρμογή περιορισμού της δόσης στη διακριτή πηγή.

14.25. ΟΡΙΑ ΔΟΣΕΩΝ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Ο καθορισμός των ορίων δόσεων για συγκεκριμένο άτομο από έκθεση του από όλες τις μονήρεις πηγές από τις οποίες ακτινοβολείται έχει βασισθεί στην πιθανότητα θανάτου από καρκίνο, την ελάττωση του χρόνου επιβίωσης λόγω θανατηφόρου καρκινογένεσης και τη δημιουργία μη θανατηφόρων καρκίνων.

Επιπλέον έχει ληφθεί υπόψη η δυνατότητα αποδοχής εκ μέρους του κοινού και των αρχών της τιμής της πιθανότητας εμφάνισης στοχαστικών βλαβών.

Η ετήσια ενεργός δόση, η αναφερόμενη σε επαγγελματικά εργαζόμενους, πρέπει να προσδιορίζεται αθροιστικά από το σύνολο της ενεργού δόσης από εξωτερικές πηγές και της δεσμευμένης σταθμισμένης δόσης λόγω εισόδου στον οργανισμό ραδιενεργών στοιχείων. Ο προσδιορισμός γίνεται από τις αρμόδιες αρχές ή τον υπεύθυνο Ακτινοπροστασίας.

Ακτινοβολία επαγγελματικά εργαζόμενων γυναικών. Οι συνθήκες εργασίας σε γυναίκα επαγγελματικά εργαζόμενη με ακτινοβολίες πρέπει να είναι τέτοιας μορφής, ώστε

από τη διάγνωση της εγκυμοσύνης μέχρι του πέρατος αυτής το έμβρυο να μην εκτίθεται σε δόση μεγαλύτερη από 1mSv.

Ο παραπάνω περιορισμός δεν είναι απαραίτητο να οδηγεί σε πλήρη αποφυγή εργασίας της εγκύου με ακτινοβολίες ή ραδιενεργά υλικά ή εισόδου της σε χώρους ακτινοβολίας. Πρέπει όμως ο εργοδότης να εξασφαλίζει ότι η πιθανότητα να εκτεθεί η γυναίκα σε σχετικά υψηλή δόση ή να προσλάβει ραδιενεργό υλικό ουσιαστικά να είναι ασήμαντη.

14.26. ΈΛΕΓΧΟΣ ΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ Η ΤΗΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΙΣΤΩΝ

Ο έλεγχος των στοχαστικών αποτελεσμάτων θα έχει σαν αποτέλεσμα και την αποφυγή των καθορισμένων αποτελεσμάτων. Στην περίπτωση όμως που έχει συμβεί αποτέλεσμα αυτού του τύπου, οι όποιες ενέργειες προϋποθέτουν τον προσδιορισμό της δόσης και αν είναι δυνατόν σταθμισμένης με τις κατάλληλες τιμές RBE. Η μονάδα της απορροφούμενης δόσης σταθμισμένης με τιμές RBE, έχει διαστάσεις Jkg^{-1} και ονομάζεται ισοδύναμο Gray, Gy-Eq.

Ελεγχόμενη περιοχή: Κάθε περιοχή μέσα στην οποία ενδέχεται να γίνει υπέρβαση των 3/10 ετησίων ορίων δόσης που καθορίζονται για τους επαγγελματικά εκτιθέμενους.

Επιβλεπόμενη περιοχή: Κάθε περιοχή στην οποία ο επαγγελματικά εργαζόμενος ενδέχεται να υπερβεί το 1/10 των ετησίων ορίων δόσης αλλά να μην υπερβεί τα 3/10 αυτών.

15. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

15.1. ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Κάθε φορά που πραγματοποιείται μια μέτρηση, στόχος της είναι η εύρεση της αληθινής τιμής του υπό μέτρηση μεγέθους. Κάθε μέτρηση όμως επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες που κάνουν τη μετρούμενη τιμή να αποκλίνει από την αληθινή. Το σφάλμα μιας μέτρησης είναι αυτή ακριβώς η απόκλιση της μετρούμενης τιμής από την αληθινή τιμή. Η αληθινή τιμή του υπό μέτρηση μεγέθους είναι μια ιδεατή έννοια και τις περισσότερες φορές δεν μπορεί να βρεθεί. Έτσι αρκούμαστε σε μια όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστη εκτίμηση της αληθινής τιμής

15.2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΤΥΧΑΙΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ. ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΚΑΙ ΕΠΑΝΑΛΗΨΙΜΟΤΗΤΑ

Υπάρχουν δύο βασικά είδη σφαλμάτων: τα συστηματικά και τα τυχαία.

Τα *συστηματικά σφάλματα* κάνουν τις μετρήσεις να αποκλίνουν από την αληθινή τιμή κατά μια σταθερή ποσότητα. Επαναλαμβανόμενες μετρήσεις του ίδιου μεγέθους, στις οποίες έχει υπεισέλθει κάποιο συστηματικό σφάλμα, παράγουν όλες το ίδιο αποτέλεσμα, το οποίο όμως είναι λανθασμένο. Αποτελέσματα μετρήσεων που εμπεριέχουν συστηματικά σφάλματα καλούνται ανακριβή (inaccurate). Τις περισσότερες φορές τα συστηματικά σφάλματα οφείλονται στα όργανα που χρησιμοποιούνται στις μετρήσεις (ζυγαριά με λάθος ρύθμιση του μηδενός, μη βαθμονομημένος μετρητής ακτινοβολιών, κ.λπ.). Συχνά είναι δύσκολο να ανιχνευτεί η παρουσία κάποιου συστηματικού σφάλματος, ιδιαίτερα όταν οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων από τα αναμενόμενα δεν είναι κραυγαλέες. Ένας τρόπος να ανιχνευτούν συστηματικά σφάλματα είναι η χρήση τυποποιημένων πρότυπων δειγμάτων, των οποίων οι αληθινές τιμές είναι γνωστές από άλλες ανεξάρτητες μετρήσεις. Για παράδειγμα μια πρότυπη ραδιενεργός πηγή Cs-137 γνωστής ενεργότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ελεγχθεί για συστηματικά σφάλματα ο βαθμολογητής δόσεων (dose calibrator) σε ένα εργαστήριο Πυρηνικής Ιατρικής.

Τα *τυχαία σφάλματα* προκαλούν αποκλίσεις σε επαναλαμβανόμενες μετρήσεις του ίδιου μεγέθους οι οποίες ποικίλουν τόσο σε μέγεθος όσο και σε πρόσημο. Συνήθως οφείλονται σε φυσικοτεχνικούς περιορισμούς στους οποίους υπόκεινται είτε τα συστήματα μέτρησης είτε το ίδιο το άτομο που εκτελεί τις μετρήσεις. Για παράδειγμα, κατά τη μέτρηση του ύψους ενός ανθρώπου υπεισέρχονται τυχαία σφάλματα που οφείλονται στον τρόπο με τον οποίο τοποθετείται η μετρο-ταινία, ή στο πως διαβάζεται η ένδειξη της. Τυχαία σφάλματα όμως μπορούν να προέλθουν και από πραγματικές τυχαίες μεταβολές του ίδιου του μετρούμενου μεγέθους. Έτσι η μέτρηση του ρυθμού κρούσεων ενός δείγματος στο γ-counter επηρεάζεται από τις τυχαίες μεταβολές του εκπεμπόμενου από το δείγμα ρυθμού φωτονίων λόγω της στατιστικής φύσης του φαινομένου της ραδιενεργού διάσπασης. Τα τυχαία σφάλματα καθορίζουν την επαναληψιμότητα (precision) των μετρήσεων. Μπορούμε να μειώσουμε την επίδραση των τυχαίων σφαλμάτων χρησιμοποιώντας προσεκτικά

σχεδιασμένες τεχνικές μέτρησης, εξελεγμένα όργανα κ.λπ, αλλά ποτέ δεν είναι δυνατόν να τα εξαλείψουμε εντελώς. Πάντοτε υπάρχει κάποιο όριο στην επαναληψιμότητα των μετρήσεων που μπορούμε να επιτύχουμε.

Η **ακρίβεια (accuracy)** και η **επαναληψιμότητα (precision)** αποτελούν ανεξάρτητα χαρακτηριστικά κάθε μέτρησης. Μια μέτρηση μπορεί να μην είναι επαναλήψιμη (μεγάλα τυχαία σφάλματα) αλλά να είναι ακριβής, με την έννοια ότι η μέση τιμή πολλών μετρήσεων θα προσεγγίζει με ακρίβεια την αληθινή τιμή. Αντίθετα, μπορεί μια μέτρηση να είναι επαναλήψιμη (μικρά τυχαία σφάλματα) αλλά να μην είναι ακριβής, λόγω ύπαρξης σημαντικών συστηματικών σφαλμάτων. Ένα χρήσιμο εποπτικό ανάλογο για την κατανόηση της ακρίβειας και της επαναληψιμότητας δίδεται στο.

15.3. ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΔΙΑΔΟΧΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Έστω ότι μία μέτρηση επαναλαμβάνεται διαδοχικές φορές και έστω N_1, N_2, \dots, N_n τα διαδοχικά αποτελέσματα των μετρήσεων, τα οποία, —πραγματικής τιμής του υπό μέτρηση μεγέθους είναι λογικό να θεωρηθεί η μέση τιμή των μετρήσεων. Η μέση τιμή N (mean) ή αριθμητικός μέσος ορίζεται ως το άθροισμα των μετρήσεων διά του πλήθους, n , των μετρήσεων:

$$N = \frac{N_1 + N_2 + \dots + N_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i \quad [15.1]$$

Ο διάμεσος (median) είναι η μέτρηση που βρίσκεται στη μεσαία θέση της σειράς, όταν όλες οι μετρήσεις διαταχθούν σε αύξουσα σειράς. Ο γεωμετρικός μέσος G (geometric mean) ορίζεται ως η νιοστή ρίζα του γινομένου των μετρήσεων:

$$G = \sqrt[n]{N_1 * N_2 * \dots * N_n} \quad [15.2]$$

Πολλές φορές τα δεδομένα είναι προτιμότερο να περιγράφονται με τη μορφή της συνάρτησης κατανομής συχνότητας $F(N)$ (frequency distribution function) που υποδηλώνει τη σχετική συχνότητα με την οποία κάθε μέτρηση εμφανίζεται στα δεδομένα.

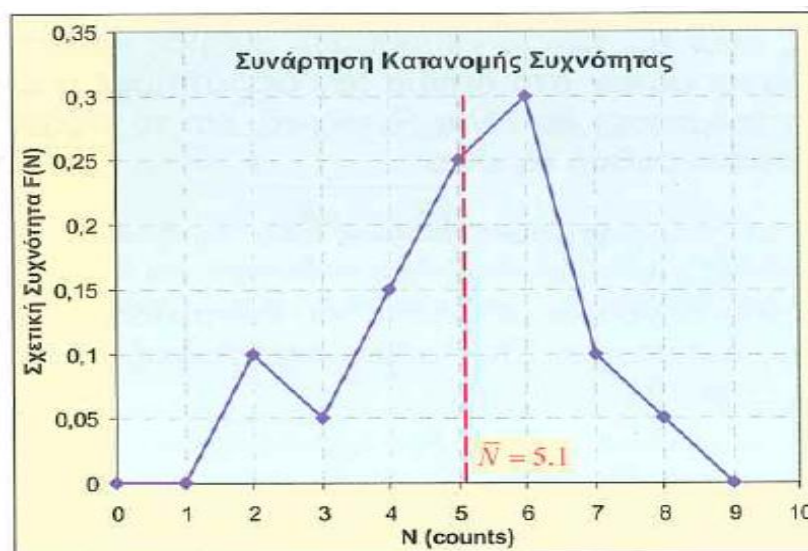
Παράδειγμα: Σε ένα σύστημα μέτρησης κρούσεων μετράται 20 φορές ο αριθμός των κρούσεων, N , λόγω υποστρώματος για χρόνο ενός λεπτού. Παρακάτω παρουσιάζονται ο πίνακας των μετρούμενων τιμών και η συνάρτηση κατανομής συχνότητας.

N	
6	2
5	5
7	6
6	8
3	5
4	4
6	7
5	5
2	6
6	4

Πίνακας 22: Μετρούμενες τιμές συνάρτηση της κατανομής

N	$F(N)$
0	$0/20=0.00$
1	$0/20=0.00$
2	$2/20=0.10$
3	$1/20=0.05$
4	$3/20=0.15$
5	$5/20=0.25$
6	$6/20=0.30$
7	$2/20=0.10$
8	$1/20=0.05$
9	$0/20=0.00$

Πίνακας 23: Μετρούμενες τιμές συνάρτηση της κατανομής



Διάγραμμα 1: Συνάρτηση κατανομής συχνότητας

Εάν είναι γνωστή η συνάρτηση κατανομής συχνότητας, η μέση τιμή N μπορεί να υπολογιστεί ακόμη κι αν δεν είναι γνωστές οι αρχικές μετρήσεις:

$$N = \sum N \cdot F(N) \quad [15.3]$$

Η απόκλιση (*deviation*) κάθε μέτρησης από τη μέση τιμή είναι απλά η διαφορά:

$$\delta_i = N_i - N \quad [15.4]$$

Το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων διά του πλήθους των μετρήσεων ελαττωμένου κατά μία καλείται διακύμανση s^2 (variance), και η τετραγωνική τιμή αυτής καλείται τυπική απόκλιση s (standard deviation).

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (N_i - N)^2 \quad [15.5]$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (N_i - N)^2} \quad [15.6]$$

Η διακύμανση και η τυπική απόκλιση είναι δείκτες που περιγράφουν το πόσο μεγάλη είναι η διασπορά των τιμών γύρω από τη μέση τιμή.

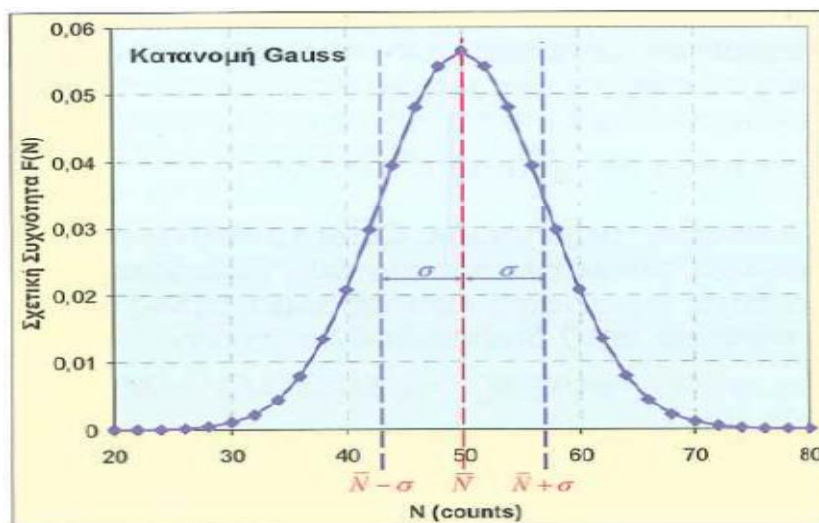
15.4. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Στην πράξη δεν είναι εφικτό κάθε μέτρηση να επαναλαμβάνεται πολλές φορές. Πρέπει να είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε την αβεβαιότητα στην τιμή ενός μεγέθους από τη μία και μοναδική μέτρηση του. Κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις αυτό είναι εφικτό και το φαινόμενο της ραδιενεργού διάσπασης πληροί αυτές τις προϋποθέσεις. Έτσι, οι μετρήσεις του αριθμού των κρούσεων μέσα σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα από κάποιο ραδιενεργό δείγμα ακολουθούν την κατανομή Poisson και εάν (όπως συνήθως) ο αριθμός των κρούσεων είναι μεγάλος, την κατανομή Gauss. Σύμφωνα με τις προβλέψεις αυτών των μοντέλων, από μια σειρά μετρήσεων κρούσεων με μέση τιμή N , η διακύμανση θα είναι ίση με N και η τυπική απόκλιση είναι ίση με \sqrt{N} .

$$\sigma^2 = N \text{ και } \sigma = \sqrt{N} \quad [15.7]$$

Τα σύμβολα σ^2 και σ χρησιμοποιούνται αντί των s^2 και s για να δηλώσουν ότι αποτελούν εκτιμήσεις του στατικού μοντέλου και όχι πραγματικές τιμές διακύμανσης και τυπικής απόκλισης υπολογισμένες από τα πραγματικά δεδομένα.

Στο Διάγραμμα 2 φαίνεται ένα παράδειγμα κατανομής Gauss με μέση τιμή $N=50$ και τυπική απόκλιση $\sigma = \sqrt{N} = 7.07$. Όταν μια σειρά υποθετικών μετρήσεων ακολουθεί την κατανομή Gauss, το 68% των μετρήσεων βρίσκεται μεταξύ των τιμών $N-\sigma$ και $N+\sigma$. Εάν δηλαδή μετρήσουμε τις κρούσεις από ένα ραδιενεργό δείγμα 1000 φορές και υπολογίσουμε μια μέση τιμή κρούσεων $N=50$, οι 680 από τις 1000 μετρήσεις μας θα βρίσκονται στην περιοχή μεταξύ 43 και 57 κρούσεων. Το 95% περίπου των μετρήσεων θα βρίσκεται μεταξύ των τιμών $N-2\sigma$ και $N+2\sigma$, ενώ πάνω από το 99% των μετρήσεων θα βρίσκεται μεταξύ των τιμών $N-3\sigma$ και $N+3\sigma$.



Διάγραμμα 2: Παράδειγμα κατανομής Gauss.

Παράδειγμα: Σε ένα σύστημα μέτρησης κρούσεων μετράται για χρόνο 5 λεπτών ο αριθμός των κρούσεων ενός ραδιενεργού δείγματος και βρίσκεται ότι $N=144$ κρούσεις. Η μοναδική αυτή μέτρηση είναι και η μόνη μας εκτίμηση της αληθινής τιμής. Επειδή η τιμή αυτή είναι μεγάλος αριθμός (>20) μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ισχύουν οι εκτιμήσεις που προκύπτουν από την κατανομή Gauss. Έτσι, η τυπική απόκλιση της μέτρησης είναι $\sigma=\sqrt{N}=\sqrt{144}=12$ κρούσεις, οπότε μπορούμε να πούμε ότι η αβεβαιότητα στο μετρούμενο αριθμό κρούσεων είναι $N=144\pm 12$ κρούσεις. Το αποτέλεσμα αυτό δηλώνει ότι εάν είχαμε το χρόνο να επαναλάβουμε τη μέτρηση πολλές φορές, η μέση τιμή των μετρήσεων που θα υπολογίζαμε θα βρισκόταν με πιθανότητα 68% κάπου μεταξύ των 132 και των 156 κρούσεων. Για να αυξήσουμε την πιθανότητα να περιέχει το διάστημα τιμών την αληθινή τιμή πρέπει υποχρεωτικά να διευρύνουμε το διάστημα: η μέση τιμή θα βρισκόταν με πιθανότητα 95% μεταξύ των 120 και των 168 κρούσεων.

Εύρος φυσιολογικών τιμών. Κάθε φορά που μετράται μια παράμετρος σε ένα βιολογικό δείγμα, ακολουθεί συνήθως η σύγκριση της μετρούμενης τιμής με τις φυσιολογικές τιμές. Το εύρος των φυσιολογικών τιμών (ή τιμών αναφοράς) ορίζεται συνήθως ως εκείνο το διάστημα τιμών το οποίο περιλαμβάνει το κεντρικό 95% των τιμών ενός δείγματος αναφοράς. Σαν δείγμα αναφοράς επιλέγεται ένα πλήθος υγιών ατόμων, ή ένα πλήθος ατόμων που δεν πάσχουν από οποιαδήποτε πάθηση η οποία ενδεχομένως να επηρέαζε τις τιμές της μετρούμενης παραμέτρου. Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι, εξ ορισμού, για ένα 5% του φυσιολογικού πληθυσμού οι τιμές της μετρούμενης παραμέτρου θα βρίσκονταν εκτός του εύρους των φυσιολογικών τιμών (2.5% θα εμφανίζει μικρότερες τιμές από το χαμηλό όριο και 2.5% μεγαλύτερες τιμές από το υψηλό όριο).

15.5. ΔΙΑΔΟΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

Στην καθημερινή κλινική πράξη της Πυρηνικής Ιατρικής, το τελικό αποτέλεσμα μιας μετρητικής διαδικασίας απαιτεί την εκτέλεση διαφόρων μαθηματικών πράξεων μεταξύ των μετρήσεων που πάρθηκαν κατά τη διαδικασία. Όταν καθεμία επί μέρους μέτρηση εμπεριέχει κάποιο σφάλμα, το συνολικό σφάλμα στο τελικό αποτέλεσμα μπορεί να βρεθεί σύμφωνα με τους κανόνες διάδοσης σφαλμάτων που ισχύουν για κάθε μαθηματική πράξη.

Πρόσθεση και αφαίρεση μετρήσεων. Όταν το τελικό αποτέλεσμα M προκύπτει από προσθέσεις ή αφαιρέσεις μεταξύ των επί μέρους μετρήσεων M_1, M_2, M_3, \dots , η καθεμία από τις οποίες έχει σφάλμα $\sigma(M_1), \sigma(M_2), \sigma(M_3), \dots$, το συνολικό σφάλμα $\sigma(M)$ δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma(M)=\sigma(M_1 \pm M_2 \pm M_3 \pm \dots)=\sqrt{\sigma(M_1)^2 + \sigma(M_2)^2 + \sigma(M_3)^2 + \dots} \quad [15.8]$$

Στην ειδική περίπτωση όπου οι μετρήσεις αφορούν μετρήσεις κρούσεων (N_1, N_2, N_3, \dots):

$$\sigma(N)=\sigma(N_1 \pm N_2 \pm N_3 \pm \dots)=\sqrt{N_1 + N_2 + N_3 + \dots} \quad [15.9]$$

Πολλαπλασιασμός μέτρησης με σταθερά. Όταν μια μέτρηση M με σφάλμα $\sigma(M)$ πολλαπλασιάζεται με μια σταθερά k , το συνολικό σφάλμα δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma(kM)=k\sigma(M). \quad [15.10]$$

Στην ειδική περίπτωση της μέτρησης κρούσεων:

$$\sigma(kN)=k\sqrt{N} \quad [15.11]$$

Πολλαπλασιασμός μετρήσεων. Όταν το τελικό αποτέλεσμα M προκύπτει από πολλαπλασιασμό δύο μετρήσεων M_1 και M_2 , η καθεμία από τις οποίες έχει σφάλμα $\sigma(M_1)$ και $\sigma(M_2)$, το συνολικό σφάλμα $\sigma(M)$ δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma(M)=\sigma(M_1M_2)=\sqrt{M_2^2\sigma(M_1)^2 + M_1^2\sigma(M_2)^2} \quad [15.12]$$

Στην ειδική περίπτωση της μέτρησης κρούσεων:

$$\sigma(N)=\sigma(N_1N_2)=\sqrt{N_1N_2(N_1+N_2)} \quad [15.13]$$

Διαίρεση μετρήσεων. Όταν το τελικό αποτέλεσμα M προκύπτει από διαίρεση δύο μετρήσεων M_1 και M_2 , η καθεμία από τις οποίες έχει σφάλματα $\sigma(M_1)$ και $\sigma(M_2)$, το συνολικό σφάλμα $\sigma(M)$ δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma(M)=\sigma(M_1/M_2)=\sqrt{\frac{\sigma(M_1)^2}{M_2^2} + \frac{M_1^2\sigma(M_2)^2}{M_2^4}} = \frac{1}{M_2} \sqrt{\sigma(M_1)^2 + \frac{M_1^2\sigma(M_2)^2}{M_2^2}} \quad [15.14]$$

Στην ειδική περίπτωση της μέτρησης κρούσεων:

$$\sigma(N)=\sigma(N_1/N_2)=\frac{1}{N_1} \sqrt{N_1 + \frac{N_1^2}{N_2}} \quad [15.15]$$

15.6. ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΡΟΥΣΕΩΝ

15.6.1. Ρυθμός κρούσεων

Οι περισσότερες μετρήσεις που γίνονται στην Πυρηνική Ιατρική αφορούν στην εύρεση του ρυθμού κρούσεων (countsperminute-cpm) από ένα δείγμα. Όταν σε χρόνο t μετρούνται συνολικά N κρούσεις από ένα δείγμα, ο ρυθμός κρούσεων R είναι απλά $R=N/t$. Το σφάλμα, σ_R , στο ρυθμό κρούσεων είναι:

$$\sigma_R = \frac{1}{t} \sqrt{N} = \sqrt{\frac{N}{t^2}} = \sqrt{\frac{R}{t}} \quad [15.16]$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι η χρήση μεγαλύτερων χρόνων μέτρησης μειώνει το σφάλμα στον υπολογισμό του ρυθμού κρούσεων.

Παράδειγμα: Ραδιενεργό δείγμα μετράται για χρόνο $t=1\text{min}$ και δίνει $N=500$ κρούσεις. Ο υπολογιζόμενος ρυθμός κρούσεων είναι $R=500\text{ cpm}$ και το σφάλμα στο ρυθμό κρούσεων είναι:

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{R}{t}} = \sqrt{\frac{500}{1}} = 22.4 \text{ cpm.} \quad [15.17]$$

Εάν το ίδιο δείγμα μετρούνταν για $t=4$ min και έδινε $N=2000$ κρούσεις, ο υπολογιζόμενος ρυθμός κρούσεων θα ήταν πάλι $R=2000/4=500$ cpm αλλά το σφάλμα στο ρυθμό κρούσεων θα ήταν:

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{R}{t}} = \sqrt{\frac{500}{4}} = 11.2 \text{ cpm.} \quad [15.18]$$

15.6.2. Επανάληψη μετρήσεων, σφάλμα στη μέση τιμή

Εάν η μέτρηση ενός δείγματος επαναληφθεί διαδοχικά φορές, η μέση τιμή των μετρήσεων αποτελεί πιο αξιόπιστη εκτίμηση της αληθινής τιμής συγκριτικά με οποιαδήποτε από τις μεμονωμένες μετρήσεις. Το σφάλμα στη μέση τιμή, σ_N , είναι μικρότερο από το σφάλμα κάθε μεμονωμένης μέτρησης κατά τον παράγοντα $1/\sqrt{n}$, διότι:

$$\sigma_N = \frac{1}{n} \sqrt{\sum N_i} = \frac{1}{n} \sqrt{n \cdot N} = \sqrt{\frac{N}{n}} \quad [15.19]$$

15.7. ΗΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

Σε όλη τη μέχρι τώρα ανάλυση, θεωρούσαμε αμελητέα την επίδραση του υποστρώματος (background). Είναι όμως γνωστό, ότι οι κρούσεις του υποστρώματος υπεισέρχονται σε όλα τα μετρητικά συστήματα της Πυρηνικής Ιατρικής. Ο ρυθμός κρούσεων του υποστρώματος, R_b , είναι ο ρυθμός που μετράται χωρίς την παρουσία του δείγματος μέσα στη μετρητική συσκευή. Εάν ο μετρούμενος ρυθμός παρουσία του δείγματος είναι R_g , τότε ο «καθαρός» ρυθμός κρούσεων, R_s , που οφείλεται μόνον στο δείγμα (αν δεν υπήρχε η επίδραση του υποστρώματος) θα είναι:

$$R_s = R_g - R_b \quad [15.20]$$

και το σφάλμα στον υπολογιζόμενο ρυθμό R_s είναι:

$$\sigma_{R_s} = \sqrt{\frac{R_g}{t_g} + \frac{R_b}{t_b}} \quad [15.21]$$

Όπου:

t_g και t_b = οι χρόνοι μέτρησης του δείγματος και του υποστρώματος αντίστοιχα.

Στην ειδική περίπτωση που οι χρόνοι μέτρησης είναι ίσοι ($t_g = t_b = t$):

$$\sigma_{R_s} = \sqrt{\frac{R_g + R_b}{t}} = \sqrt{\frac{R_s + 2R_b}{t}} \quad [15.22]$$

Παράδειγμα: Ραδιενεργό δείγμα μετράται στο γ -counter για χρόνο $t=4\text{min}$ και δίνει $N_g=5000$ κρούσεις. Στον ίδιο χρόνο μια μέτρηση του υποστρώματος δίνει $N_b=4000$ κρούσεις. Οι υπολογιζόμενοι ρυθμοί κρούσεων είναι $R_g=1250\text{cpm}$ και $R_b=1000\text{cpm}$, οπότε ο «καθαρός» ρυθμός κρούσεων του δείγματος είναι $R_s=1250-1000=250\text{cpm}$. Το σφάλμα στον καθαρό ρυθμό κρούσεων είναι:

$$\sigma_{R_s} = \sqrt{\frac{250 + 2 \cdot 1000}{4}} = \sqrt{\frac{2250}{4}} = 23.7\text{cpm} \quad [15.23]$$

Δηλαδή $R_s=250 \pm 23.7\text{cpm}$, ή με άλλα λόγια, το R_s υπολογίστηκε με ένα σφάλμα της τάξης του 9.5% περίπου, τη στιγμή που τα επί τοις εκατό σφάλματα στο R_g και στο R_b είναι πολύ μικρότερα:

$$\sigma_{R_g} = \sqrt{\frac{1250}{4}} = 17.7\text{cpm}, \text{ δηλαδή } R_g = 1250 \pm 17.7\text{cpm} \text{ (ή με άλλα λόγια 1.4\% περίπου)} \quad [15.24]$$

$$\sigma_{R_b} = \sqrt{\frac{1000}{4}} = 15.8\text{cpm}, \text{ δηλαδή } R_b = 1000 \pm 15.8\text{cpm} \text{ (ή με άλλα λόγια 1.6\% περίπου)}. \quad [15.25]$$

Ο πειραματιστής αποφασίζει να θωρακίσει καλύτερα το γ -counter και επαναλαμβάνει τη μέτρηση. Οι τιμές που παίρνει πάλι για χρόνο $t=4\text{min}$ είναι $N_g=1500$ κρούσεις ($R_g = 375\text{cpm}$) και $N_b=500$ κρούσεις ($R_b = 125\text{cpm}$). Ο καθαρός ρυθμός κρούσεων του δείγματος είναι πάλι $R_s=375-125=250\text{cpm}$, αλλά το σφάλμα τώρα είναι:

$$\sigma_{R_s} = \sqrt{\frac{250 + 2 \cdot 125}{4}} = \sqrt{\frac{500}{4}} = 11.2\text{cpm}, \text{ ή 4.5\% περίπου}. \quad [15.26]$$

Συνεπώς, η παρουσία υψηλού ρυθμού κρούσεων υποστρώματος είναι ανεπιθύμητα, διότι αυξάνει το σφάλμα στον υπολογισμό του καθαρού ρυθμού κρούσεων του δείγματος.

15.8. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΤΑΞΥ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Όπως τονίστηκε νωρίτερα, εάν επαναλάβουμε δύο ή περισσότερες φορές τη μέτρηση του ίδιου δείγματος θα πάρουμε διαφορετικά αποτελέσματα. Με αυτό σαν δεδομένο, όταν μετρούνται δυο διαφορετικά δείγματα και λαμβάνονται δύο διαφορετικά αποτελέσματα πως μπορεί κανείς να εξασφαλίσει ότι οι αληθινές τιμές των δύο δειγμάτων είναι πράγματι διαφορετικές μεταξύ τους και ότι η παρατηρούμενη διαφορά στις μετρήσεις δεν οφείλεται απλά σε τυχαίες στατιστικές διακυμάνσεις; Στο ερώτημα αυτό απάντηση με απόλυτη βεβαιότητα δεν μπορεί να δοθεί. Μπορούμε όμως να συγκρίνουμε την παρατηρούμενη διαφορά ανάμεσα στις μετρήσεις με το αναμενόμενο σφάλμα και να υπολογίσουμε πόσο «στατιστικά σημαντική» είναι αυτή η παρατηρούμενη διαφορά.

Σε γενικές γραμμές, διαφορές που είναι μικρότερες από 2 φορές το αναμενόμενο σφάλμα θεωρούνται μη στατιστικά σημαντικές, καθώς υπάρχει τουλάχιστον 5% πιθανότητα

να οφείλονται απλά και μόνο στη στατιστική διακύμανση των μετρήσεων είναι μικρότερη από 5% (ή 1%).

Παράδειγμα: Δύο δείγματα μετρούνται στο γ -counter για χρόνο $t=4$ min το καθένα. Το πρώτο δείγμα δίνει $N_1=3600$ κρούσεις και το δεύτερο δίνει $N_2=3500$ κρούσεις. Οι υπολογιζόμενοι ρυθμοί κρούσεων είναι $R_1=900$ cpm και $R_2=875$ cpm, οπότε η διαφορά τους είναι $(R_1 - R_2) = 25$ cpm. Το ερώτημα είναι εάν αυτή η διαφορά είναι στατιστικά σημαντική (δηλαδή εάν το δείγμα 1 περιέχει περισσότερη ραδιενέργεια από το δείγμα 2), ή εάν θα μπορούσε να οφείλεται απλά σε στατιστικές διακυμάνσεις των μετρούμενων ρυθμών κρούσεων. Το σφάλμα στον υπολογιζόμενο ρυθμό $R_1 - R_2$ είναι:

$$\sigma_{R_1 - R_2} = \sqrt{\frac{900+875}{4}} = \sqrt{\frac{1775}{4}} = 21.1 \text{ cpm, δηλαδή } (R_1 - R_2) = 25 \pm 21.1 \text{ cpm.} \quad [15.27]$$

Εφόσον η διαφορά είναι μικρότερη από 2 φορές το σφάλμα, κρίνεται στατιστικά μη σημαντική: ο αυξημένος ρυθμός κρούσεων του δείγματος 1 θα μπορούσε να οφείλεται στις τυχαίες διακυμάνσεις του ρυθμού κρούσεων. Δεν έχει όμως αποκλειστεί το ενδεχόμενο το δείγμα 1 να είναι πράγματι πιο ραδιενεργό από το δείγμα 2.

Για να εξετάσουμε καλύτερα αυτό το ενδεχόμενο, επαναλαμβάνουμε το πείραμα, αυτή τη φορά με χρόνους μέτρησης $t=30$ min και για τα δύο δείγματα. Λαμβάνουμε: $N_1=26940$ κρούσεις, $N_2=26220$ κρούσεις, οπότε $R_1=898$ cpm, $R_2=874$ cpm και $(R_1 - R_2) = 24$ cpm. Το σφάλμα στο ρυθμό $R_1 - R_2$ τώρα είναι:

$$\sigma_{R_1 - R_2} = \sqrt{\frac{898+874}{30}} = \sqrt{\frac{1772}{30}} = 7.7 \text{ cpm, δηλαδή } (R_1 - R_2) = 24 \pm 7.7 \text{ cpm.} \quad [15.28]$$

Εφόσον η διαφορά είναι μεγαλύτερη από 3 φορές το σφάλμα, κρίνεται στατιστικά σημαντική. Η πιθανότητα ο αυξημένος ρυθμός κρούσεων του δείγματος 1 να οφείλεται στις τυχαίες διακυμάνσεις του ρυθμού κρούσεων είναι κάτω από 1%, άρα με 99% βεβαιότητα το δείγμα 1 περιέχει περισσότερη ραδιενέργεια από το δείγμα 2.

15.9. ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΙΜΗ ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΑ

Συνεχίζοντας την παραπάνω συλλογιστική, για κάθε μετρητικό σύστημα και για συγκεκριμένο χρόνο μέτρησης μπορεί να υπολογιστεί η ελάχιστη ανιχνεύσιμη ενεργότητα (Minimum Detectable Activity - MDA), η ενεργότητα δηλαδή εκείνη που μπορεί να προκαλέσει μια αύξηση του ρυθμού των κρούσεων που να είναι στατιστικά σημαντική σε σύγκριση με τις διακυμάνσεις του ρυθμού κρούσεων του υποστρώματος που καταγράφονται στον ίδιο χρόνο μέτρησης. Αρχικά πρέπει να επιλέξει κανείς το επίπεδο εμπιστοσύνης που θεωρεί στατιστικά σημαντικό, το οποίο συνήθως τίθεται στο 95% (διαφορές μεγαλύτερες από 2σ), ή 99% (διαφορές μεγαλύτερες από 3σ). Κατόπιν για δεδομένο χρόνο μέτρησης t , η ελάχιστη ανιχνεύσιμη ενεργότητα θα είναι εκείνη για την οποία ο ρυθμός κρούσεων είναι:

$$\text{MDA} = 2 \sqrt{\frac{R_b}{t}} \quad \text{ή} \quad \text{MDA} = 3 \sqrt{\frac{R_b}{t}} \quad [15.29]$$

Παράδειγμα: Σε ένα μετρητικό σύστημα μετράται το υπόστρωμα για χρόνο $t=4\text{min}$ και λαμβάνονται 2000 κρούσεις. Ο ρυθμός κρούσεων του υποστρώματος είναι $R_b=500\text{cpm}$, οπότε η MDA για χρόνο μέτρησης $t=4\text{min}$ είναι η ενεργότητα που αντιστοιχεί σε ρυθμό κρούσεων:

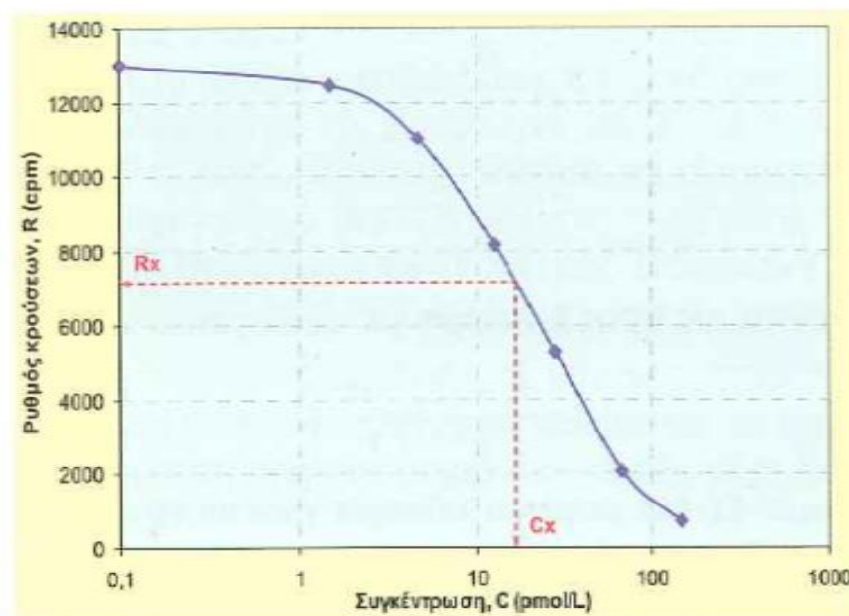
$$\text{MDA}=2\sqrt{\frac{500}{4}}=22.4\text{ cpm.} \quad [15.30]$$

Στο ίδιο σύστημα, με τον ίδιο ρυθμό κρούσεων λόγω υποστρώματος, αλλά για χρόνο μέτρησης 30 min, η MDA θα ήταν η ενεργότητα που αντιστοιχεί σε ρυθμό κρούσεων:

$$\text{MDA}=2\sqrt{\frac{500}{30}}=8.2\text{cpm} \quad [15.31]$$

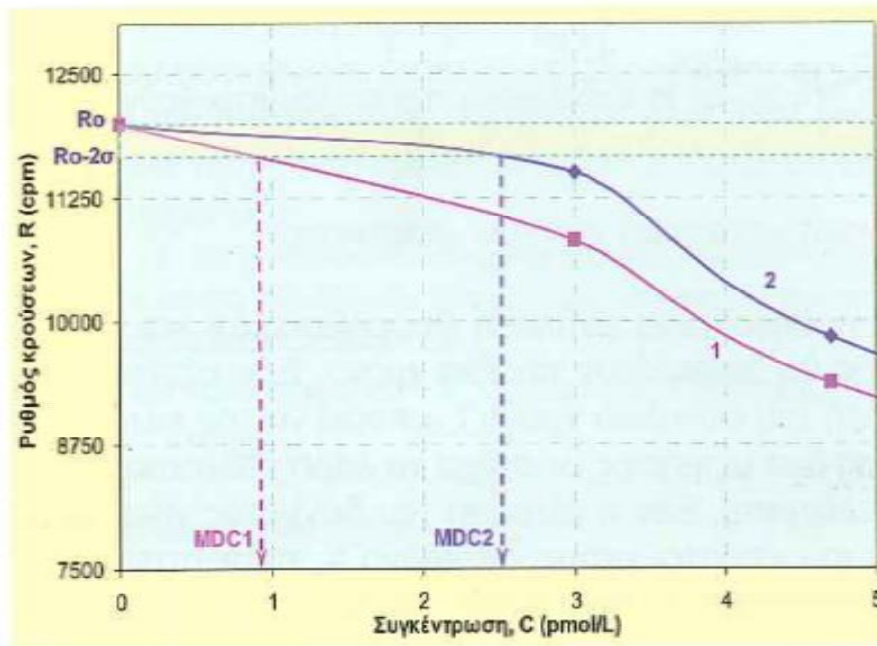
15.10. ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΙΜΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΣΕ ΡΑΔΙΟΑΝΟΣΟΛΟΓΙΚΟΥΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥΣ

Οι ραδιοανασολογικοί προσδιορισμοί χρησιμοποιούνται σήμερα ευρέως για τη μέτρηση της συγκέντρωσης διάφορων βιομορίων στον ορό, στα ούρα ή σε άλλα βιολογικά υγρά των εξεταζόμενων. Απαραίτητο βήμα στη διαδικασία αποτελεί η επεξεργασία και η μέτρηση του ρυθμού κρούσεων από μια σειρά δειγμάτων γνωστής συγκέντρωσης (πρότυπα δείγματα-standards). Από τα δείγματα αυτά κατασκευάζεται η πρότυπη καμπύλη αναφοράς (Διάγραμμα 3). Η μέτρηση του ρυθμού κρούσεων ενός άγνωστης συγκέντρωσης δείγματος, R_x , που έχει υποστεί την ίδια επεξεργασία με τα πρότυπα δείγματα, και η χρήση της καμπύλης αναφοράς επιτρέπει τον προσδιορισμό της άγνωστης συγκέντρωσης, C_x .



Διάγραμμα 3: Πρότυπη καμπύλη αναφοράς ραδιοανασολογικού προσδιορισμού. Από το ρυθμό κρούσεων του άγνωστου δείγματος R_x , προσδιορίζεται, μέσω της καμπύλης αναφοράς, η συγκέντρωση C_x .

Μια σημαντική παράμετρος ποιότητας ενός ραδιοανασολογικού προσδιορισμού είναι η ελάχιστη ανιχνεύσιμη συγκέντρωση (Minimum Detectable Concentration - MDC), του βιομορίου που μπορεί να μετρηθεί, η συγκέντρωση δηλαδή του βιομορίου, για την οποία ο μετρούμενος ρυθμός κρούσεων είναι στατιστικά διαφορετικός από το ρυθμό κρούσεων που αντιστοιχεί στο πρότυπο δείγμα μηδενικής συγκέντρωσης. Η MDC εξαρτάται τόσο από το σφάλμα σ στη μέτρηση του ρυθμού κρούσεων του μηδενικού προτύπου δείγματος (R_0), όσο και από την κλίση της καμπύλης αναφοράς. Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 4, η MDC ορίζεται εκεί που η ευθεία $R_0-2\sigma$ τέμνει την πρότυπη καμπύλη αναφοράς.



Διάγραμμα 4: Εύρεση της MDC σε δύο πρότυπες καμπύλες αναφοράς με διαφορετικές κλίσεις. Οι συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στην περιοχή ρυθμού κρούσεων μεταξύ R_0 και $R_0-2\sigma$ δε διαφέρουν στατιστικά από τη μηδενική συγκέντρωση. Η MDC ορίζεται εκεί που η ευθεία $R_0-2\sigma$ τέμνει την πρότυπη καμπύλη αναφοράς. Έτσι, η καμπύλη 2 με τη μικρότερη κλίση δίνει μεγαλύτερη τιμή για τη MDC (η ευαισθησία της μεθόδου με την καμπύλη 2 είναι χειρότερη).

15.11. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΑΓΚΑΙΑ ΧΡΟΝΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Σε ένα μετρητικό σύστημα με εκτιμώμενο ρυθμό κρούσεων υποστρώματος R_b πρέπει να μετρηθεί ένα δείγμα με εκτιμώμενο ρυθμό κρούσεων R_g . Πολλές φορές τίθεται το ερώτημα: πόσο χρόνο πρέπει να διαθέσει κανείς για τη μέτρηση των R_g και R_b έτσι ώστε ο καθαρός ρυθμός κρούσεων του δείγματος ($R_s = R_g - R_b$) να υπολογιστεί με ένα συγκεκριμένο ποσοστιαίο σφάλμα;

Από τη σχέση [15.21] το σφάλμα στον R_s είναι:

$$\sigma_{R_s} = \sqrt{\frac{R_s + 2R_b}{t}} \quad [15.32]$$

Το ποσοστιαίο (επί τοις εκατό) σφάλμα ορίζεται ως:

$$V_{R_s} = \frac{\sigma_{R_s}}{R_s} \times 100 \quad [15.33]$$

Οπότε:

$$V_{R_s} = \frac{1}{R_s} \sqrt{\frac{R_s + 2R_b}{t}} \times 100 \rightarrow V_{R_s} = \sqrt{\frac{R_s + 2R_b}{t \cdot R_s^2}} \times 100 \rightarrow \left(\frac{V_{R_s}}{100}\right)^2 = \frac{R_s + 2R_b}{t \cdot R_s^2} \quad [15.34]$$

και λύνοντας ως προς t , παίρνουμε:

$$t = \frac{R_s + 2R_b}{t \cdot R_s^2} \left(\frac{100}{V_{R_s}}\right)^2 \quad [15.35]$$

Παράδειγμα: Σε ένα μετρητικό σύστημα γίνονται σύντομες προκαταρκτικές μετρήσεις ενός δείγματος και του υποστρώματος οι οποίες εκτιμούν το ρυθμό κρούσεων του δείγματος στην περιοχή των 600 rpm και του υποστρώματος στην περιοχή των 150 rpm. Πόσο χρόνο πρέπει να διαρκέσει η μέτρηση του δείγματος και του υποστρώματος ώστε ο καθαρός ρυθμός κρούσεων του δείγματος να προσδιοριστεί με σφάλμα όχι μεγαλύτερο από 3%;

Ισχύει: (εκτίμηση R_g) = 600 rpm, (εκτίμηση R_b) = 150 rpm, οπότε (εκτίμηση R_s) = 450 rpm. Από τη σχέση [15.35]:

$$t = \frac{450 + 2 \cdot 150}{450^2} \left(\frac{100}{3}\right)^2 = 4.1 \text{ min} \quad [15.36]$$

Και το δείγμα και το υπόστρωμα πρέπει να μετρηθούν για 4.1 min, άρα ο συνολικός χρόνος μέτρησης θα είναι 8.2 min.

15.12. ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΧΡΟΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Στην προηγούμενη ανάλυση θεωρήθηκε ότι και οι δύο μετρήσεις θα διαρκέσουν τον ίδιο χρόνο. Εάν κάποιος έχει στη διάθεση του συνολικό χρόνο t , μπορεί να τον καταναείμει άνισα στις δύο μετρήσεις με στόχο να λάβει καλύτερα στατιστικά αποτελέσματα. Εάν η μέτρηση του δείγματος γίνει για χρόνο t_g και του υποστρώματος για χρόνο t_b , προκύπτει ότι, για να ελαχιστοποιηθεί το ποσοστιαίο σφάλμα στον υπολογισμό του καθαρού ρυθμού κρούσεων του δείγματος R_s ο συνολικός χρόνος $t = t_g + t_b$, πρέπει να μοιραστεί έτσι ώστε:

$$\frac{t_b}{t_g} = \sqrt{\frac{R_b}{R_g}} \quad [15.37]$$

Παράδειγμα: Στο προηγούμενο παράδειγμα, πως μπορεί να κατανεμηθεί καλύτερα ο συνολικός χρόνος των 8.2 min ανάμεσα στις δύο μετρήσεις ώστε να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα στον καθαρό ρυθμό κρούσεων;

Από τη σχέση [15.37]:

$$\frac{t_g}{t_b} = \sqrt{\frac{450}{150}} = 1.73 \rightarrow t_g = 1.73 \cdot t_b \quad [15.38]$$

και επειδή:

$$t_g + t_b = t \rightarrow 1.73 \cdot t_b + t_b = 8.2 \rightarrow 2.73 \cdot t_b = 8.2 \rightarrow t_b = 3.0 \text{ min}, \quad [15.39]$$

οπότε:

$$t_g = t - t_b = 5.2 \text{ min} \quad [15.40]$$

Με αυτούς τους χρόνους μέτρησης, από τη σχέση (9) προκύπτει ότι το σφάλμα στον καθαρό ρυθμό κρούσεων R_s θα είναι:

$$\sigma_{R_s} = \sqrt{\frac{R_g}{t_g} + \frac{R_b}{t_b}} = \sqrt{\frac{600}{5.2} + \frac{150}{3}} = 12.9 \text{ cpm}, \quad [15.41]$$

και το ποσοστιαίο σφάλμα θα είναι:

$$V_{R_s} = \frac{\sigma_{R_s}}{R_s} \times 100 = \frac{12.9}{450} \times 100 = 2.8\% \quad [15.42]$$

Δηλαδή με τη βέλτιστη κατανομή του συνολικού χρόνου μέτρησης έχουμε μια μικρή βελτίωση στο ποσοστιαίο σφάλμα του αποτελέσματος.

15.13. ΕΙΔΙΚΕΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΑΣΙΕΣ

15.13.1. Η δοκιμασία χ^2

Η δοκιμασία χ^2 (chi-square test) είναι μια στατιστική δοκιμασία με την οποία μπορούμε να ελέγξουμε εάν οι διακυμάνσεις που παρατηρούνται σε μια σειρά από επαναλαμβανόμενες μετρήσεις είναι σύμφωνες με τις προβλεπόμενες από την κατανομή Poisson.

Ο στατιστικός δείκτης χ^2 υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\chi^2 = \frac{(n-1)}{N} \sigma^2 \quad [15.43]$$

Όπου:

- n το πλήθος των μετρήσεων
- N η μέση τιμή των μετρήσεων
- σ η τυπική απόκλιση.

Η τιμή του δείκτη συγκρίνεται με κατάλληλους πίνακες τιμών της κατανομής χ^2 για ηβαθμούς ελευθερίας, από τους οποίους προκύπτει μια τιμή πιθανότητας, p . Εάν το ρείναι μικρότερο του 0.01, η παρατηρούμενη διακύμανση των μετρήσεων είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν που θα αναμενόταν εάν οι μετρήσεις ακολουθούσαν κατανομή Poisson (στις μετρήσεις υπεισέρχονται κι άλλοι παράγοντες που προκαλούν διακυμάνσεις των αποτελεσμάτων εκτός από τις τυχαίες στατιστικές διακυμάνσεις). Αντίθετα εάν το ρείναι μεγαλύτερο του 0.99, η παρατηρούμενη διακύμανση των μετρήσεων είναι πολύ μικρότερη. Τιμές του ρμεταξύ 0.05 και 0.95 θεωρούνται γενικά αποδεκτές.

Παράδειγμα: Ένα δείγμα που περιέχει ποσότητα I-125 μετράται 20 φορές για χρόνο ενός λεπτού σε μετρητή ραδιενεργών δειγμάτων (γ -counter) και λαμβάνονται οι παρακάτω μετρήσεις:

n	N	n	N	N	N	n	N
1	34466	6	34190	11	34054	16	34550
2	34557	7	34111	12	34498	17	34382
3	34440	8	34316	13	34537	18	34479
4	34196	9	34372	14	34210	19	34351
5	34741	10	34207	15	34132	20	34730

Η μέση τιμή των μετρήσεων είναι $N=34375.95$, η τυπική απόκλιση $\sigma=198.15$ και από τη σχέση (15) προκύπτει $\chi^2=21.7$. Από τους πίνακες της κατανομής χ^2 για $n=20$ βαθμούς ελευθερίας προκύπτει μια τιμή για το $p=0.357$, εντός των αποδεκτών ορίων: οι παρατηρούμενες διακυμάνσεις δικαιολογούνται πλήρως από την αναμενόμενη στατιστική διακύμανση των ραδιενεργών διασπάσεων, όπως προβλέπεται από την κατανομή Poisson.

15.13.2. Η δοκιμασία Student's t

Έστω ένας πληθυσμός που αποτελείται από N άτομα για τα οποία ενδιαφέρει να μετρήσουμε κάποιο χαρακτηριστικό. Επειδή συνήθως είναι αδύνατον να πραγματοποιηθούν μετρήσεις σε όλα τα άτομα του πληθυσμού, επιλέγεται ένα τυχαίο δείγμα από n άτομα ($n < N$) στα οποία πραγματοποιούνται οι μετρήσεις. Εάν το δείγμα μπορεί να θεωρηθεί αντιπροσωπευτικό ολόκληρου του πληθυσμού, η μέση τιμή του δείγματος μπορεί να αποτελεί μια ασφαλή εκτίμηση της μέσης τιμής του πληθυσμού.

Η δοκιμασία t (t -test ή Student's t -test) είναι μια στατιστική δοκιμασία με την οποία μπορούμε να ελέγξουμε εάν οι μέσες τιμές δύο δειγμάτων από δύο πληθυσμούς διαφέρουν μεταξύ τους. Υπάρχουν δύο εκδοχές του t -test: στην πρώτη τα δύο δείγματα είναι εντελώς ανεξάρτητα μεταξύ τους (independent sample t -test) ενώ στη δεύτερη τα δύο δείγματα αποτελούνται από τα ίδια «άτομα» στα οποία η μέτρηση έχει γίνει δύο φορές, συνήθως πριν και μετά από κάποια παρέμβαση (paired sample t -test). Απαραίτητα προϋπόθεση για την αξιόπιστη εφαρμογή του t -test είναι τα δεδομένα και των δύο δειγμάτων να ακολουθούν την κανονική κατανομή.

Αρχικά πρέπει να οριστεί η «Μηδενική υπόθεση» (Null hypothesis, H_0) η οποία συνήθως είναι ότι οι μέσες τιμές των πληθυσμών είναι ίσες. Κατόπιν, ουσιαστικά υπολογίζεται η πιθανότητα να είναι η μηδενική υπόθεση αληθινή, για τα δεδομένα δείγματα με τις δεδομένες μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις. Εάν αυτή η πιθανότητα προκύψει αρκούντως μικρή, τα δεδομένα μας οδηγούν στο να απορρίψουμε τη μηδενική υπόθεση και

να αποδεχτούμε την Εναλλακτική υπόθεση (Alternative hypothesis, H_1) ότι δηλαδή οι μέσες τιμές των πληθυσμών είναι άνισες.

α) *independent samples t-test.*

Έστω δύο δείγματα πλήθους n_1 και n_2 στα οποία μετράται ένα χαρακτηριστικό X . Έστω X_1 και X_2 οι μέσες τιμές των μετρήσεων και s_1 και s_2 η τυπική τους απόκλιση. Ζητείται να εξεταστεί εάν διαφέρουν στατιστικά οι δύο μέσες τιμές, εάν δηλαδή τα δύο δείγματα μπορεί να ανήκουν στον ίδιο πληθυσμό ή όχι. (Μηδενική Υπόθεση: $H_0: X_1 = X_2$, Εναλλακτική Υπόθεση: $H_1: X_1 \neq X_2$). Ουσιαστικά αυτό που ζητείται είναι να συγκριθούν οι παρατηρούμενες διαφορές στις μέσες τιμές των δύο δειγμάτων σε σχέση με τις τυχαίες διακυμάνσεις του χαρακτηριστικού μέσα σε κάθε δείγμα. Ο στατιστικός δείκτης τυπολογίζεται από τη σχέση:

$$t = \frac{|X_1 - X_2|}{\sqrt{[(n_2 - 1)s_1^2 + (n_1 - 1)s_2^2] / (n_1 + n_2 - 2)}} \times \frac{1}{\sqrt{(1/n_1) + (1/n_2)}} \quad [15.44]$$

η οποία μπορεί να απλοποιηθεί στην περίπτωση όπου $n_1 \approx n_2$ και το καθένα είναι αρκούντως μεγάλο (π.χ. >10):

$$t = \frac{|X_1 - X_2|}{\sqrt{2(s_1^2 + s_2^2) / (n_1 + n_2 - 2)}} \quad [15.43]$$

Η τιμή του δείκτη συγκρίνεται με κατάλληλους πίνακες τιμών της κατανομής t για $n_1 + n_2 - 2$ βαθμούς ελευθερίας, από τους οποίους προκύπτει μια τιμή πιθανότητας, p . Εάν το ρεϊναι μικρότερο του 0.05, υπάρχει κάτω από 5% πιθανότητα τα δύο δείγματα να προέρχονται από τον ίδιο πληθυσμό και παρόλα αυτά οι μέσες τιμές τους να διαφέρουν τόσο σε σχέση με τις διακυμάνσεις των τιμών μέσα σε κάθε δείγμα. Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι υπάρχουν επαρκή στοιχεία που συνηγορούν στο να απορρίψουμε την Μηδενική Υπόθεση. Στην αντίθετη περίπτωση, όπου το ρεϊναι μεγαλύτερο του 0.05, τα στοιχεία δεν επαρκούν στο να απορριφθεί η Μηδενική Υπόθεση. Αυτό σημαίνει ότι τα δύο δείγματα θα μπορούσε να προέρχονται από τον ίδιο πληθυσμό και οι παρατηρούμενες διαφορές στις μέσες τιμές τους να οφείλονται απλά στην τύχη. Η μη απόρριψη της Μηδενικής Υπόθεσης δε σημαίνει απαραίτητα ότι η Μηδενική Υπόθεση είναι αληθινή: σημαίνει απλά ότι από τα συγκεκριμένα δεδομένα δεν μπορεί να αποκλειστεί η πιθανότητα να είναι αληθινή.

Παράδειγμα: Μετά από διαρροή ραδιενέργειας σε ένα πυρηνικό εργοστάσιο υπάρχει υπόνοια για τοπική μόλυνση του εδάφους. Συλλέγονται 15 δείγματα εδάφους από την περιοχή του εργοστασίου και 15 δείγματα εδάφους παρόμοιας σύστασης από μια απομακρυσμένη περιοχή. Τα δείγματα μετρούνται κατάλληλα και καταγράφονται οι τιμές της ραδιενέργειας που περιέχουν. Η μέση τιμή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας από τα πρώτα 15 δείγματα βρέθηκε $X_1 = 40.5$ Bq/mL, με τυπική απόκλιση $s_1 = 2.1$ Bq/mL, ενώ από τα δεύτερα 15 δείγματα βρέθηκε $X_2 = 38.9$ Bq/mL και $s_2 = 1.4$ Bq/mL αντίστοιχα. Η Μηδενική Υπόθεση είναι $H_0: X_1 = X_2$. Αντικαθιστώντας στη σχέση [15.43]:

$$t = \frac{|40.5 - 38.9|}{\sqrt{2(2.1^2 + 1.4^2) / (15 + 15 - 2)}} = -2.33 \quad [15.44]$$

Από τους πίνακες της κατανομής t για $n = 28$ βαθμούς ελευθερίας προκύπτει μια τιμή για το $p = 0.027$, μικρότερη από 0.05, άρα υπάρχουν επαρκή δεδομένα που συνηγορούν στο να απορρίψουμε τη Μηδενική Υπόθεση και να συμπεράνουμε ότι $X_1 \neq X_2$, δηλαδή ότι η μέση

τιμή της συγκέντρωσης ραδιενέργειας στα δείγματα κοντά στο εργοστάσιο είναι διαφορετική από αυτήν στα δείγματα της απομακρυσμένης περιοχής.

Οι τιμές που βρέθηκαν για το και για το προηγούμενο παράδειγμα αντιστοιχούν στο λεγόμενο αμφίπλευρο τεστ (two-sided test), με την έννοια ότι οι παρατηρούμενες διαφορές στις μέσες τιμές θα μπορούσαν να είναι είτε θετικές ($X_1 > X_2$) είτε αρνητικές ($X_1 < X_2$). Με το αμφίπλευρο τεστ μπορούμε απλά να συμπεράνουμε ότι $X_1 \neq X_2$. Εάν εκ των προτέρων καθορίσουμε ότι μας ενδιαφέρει μόνον εάν $X_1 > X_2$ τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το μονόπλευρο τεστ (one-sided test). Στην περίπτωση αυτή η Μηδενική Υπόθεση θα πρέπει να διατυπωθεί διαφορετικά: (Μηδενική Υπόθεση: $H_0: X_1 = X_2$ ή $X_1 < X_2$, Εναλλακτική υπόθεση: $H_1: X_1 > X_2$).

β) *paired samples t-test.*

Έστω ένα δείγμα πλήθους n στο οποίο μετράται ένα χαρακτηριστικό X και $X_{1,1}, X_{1,2}, \dots, X_{1,n}$ οι μετρήσεις κάθε ατόμου του δείγματος. Ακολουθεί μια παρέμβαση σε όλα τα άτομα του δείγματος και μετά από την παρέμβαση ξαναμετράται το χαρακτηριστικό X και έστω $X_{2,1}, X_{2,2}, \dots, X_{2,n}$ οι νέες μετρήσεις. Ζητείται να εξεταστεί εάν η παρέμβαση είχε κάποιο αποτέλεσμα στις τιμές του χαρακτηριστικού. Στην περίπτωση αυτή δεν μας ενδιαφέρει να συγκρίνουμε τις μέσες τιμές X_1 και X_2 μεταξύ τους. Μας ενδιαφέρει εάν η παρέμβαση προκάλεσε κάποιες μεταβολές στις τιμές του X στα άτομα του δείγματος και πρέπει να εξετάσουμε εάν η μέση τιμή των μεταβολών αυτών είναι διαφορετική από το μηδέν.

Πρώτα πρέπει να υπολογίσουμε τις διαφορές $\Delta X_i (X_{1,1} - X_{2,1}, X_{1,2} - X_{2,2}, \dots, X_{1,n} - X_{2,n})$, τη μέση τιμή τους X_Δ και την τυπική τους απόκλιση s_Δ . Η Μηδενική Υπόθεση είναι: $H_0: X_\Delta = 0$, ενώ η Εναλλακτική Υπόθεση είναι: $H_1: X_\Delta \neq 0$. Ο στατικός δείκτης τυπολογίζεται τώρα από τη σχέση:

$$t = \frac{|X_\Delta|}{s_\Delta / \sqrt{n}} \quad [15.45]$$

και η τιμή του συγκρίνεται με κατάλληλους πίνακες τιμών της κατανομής t για $n-1$ βαθμούς ελευθερίας, από τους οποίους προκύπτει μια τιμή πιθανότητας, p , η οποία ερμηνεύεται όπως προηγουμένως.

Παράδειγμα: Τα 15 μολυσμένα δείγματα του προηγούμενου παραδείγματος υφίστανται κατάλληλη επεξεργασία με σκοπό την απομόλυνση τους και μετά ξαναμετρώνται.

Η μέση τιμή των διαφορών X_Δ ισούται με 0.3 Bq/mL με τυπική απόκλιση $S_\Delta = 0.47$ Bq/mL. Αντικαθιστώντας στη σχέση [15.45]:

$$t = \frac{0.3}{0.47 / \sqrt{15}} = 2.48 \quad [15.46]$$

Από τους πίνακες της κατανομής t για $n=14$ βαθμούς ελευθερίας προκύπτει μια τιμή για το $p=0.026$, τιμή μικρότερη από 0.05, άρα υπάρχουν επαρκή δεδομένα που συνηγορούν στο να απορρίψουμε τη Μηδενική Υπόθεση και να συμπεράνουμε ότι $X_\Delta \neq 0$, δηλαδή ότι η μέση τιμή των διαφορών της συγκέντρωσης ραδιενέργειας στα δείγματα πριν και μετά την απομόλυνση είναι διάφορη του μηδενός. Από τη θετική μέση τιμή της διαφοράς (πριν-μετά = 0.3 Bq/mL), προκύπτει ότι η συγκέντρωση ραδιενέργειας μετά είναι κατά μέσο όρο μικρότερη απ' ό,τι πριν, συνεπώς η επεξεργασία με σκοπό την απομόλυνση είχε πράγματι αποτέλεσμα. Αξίζει κανείς να παρατηρήσει εδώ ότι υπάρχουν κάποια δείγματα για τα οποία η συγκέντρωση ραδιενέργειας μετά μετρήθηκε μεγαλύτερη απ' ό,τι πριν. Αυτό δε σημαίνει

αναγκαστικά ότι τα δείγματα αυτά μολύνθηκαν περισσότερο εξαιτίας της επεξεργασίας. Οι αυξημένες μετρήσεις μπορεί να αποδοθούν στην τυχαία διακύμανση των μετρήσεων λόγω της στατιστικής φύσης του φαινομένου.

15.14. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΙΜΩΝ, ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗ

Συχνά αναρωτιόμαστε εάν υπάρχει κάποια συσχέτιση ανάμεσα στην τιμή μιας παραμέτρου και στην τιμή μιας άλλης (για παράδειγμα ανάμεσα στην τιμή της κρεατινίνης ορού και του ρυθμού σπειραματικής διήθησης), με απώτερο βέβαια σκοπό, να μπορούμε να προβλέψουμε την τιμή της μιας παραμέτρου εάν γνωρίζουμε την τιμή της άλλης.

Ο πιο απλός τρόπος να εξετάσει κανείς εάν υπάρχει συσχέτιση ανάμεσα σε δύο παραμέτρους είναι να τοποθετήσει τα ζεύγη των τιμών τους σε ένα διάγραμμα x-γ και να προσπαθήσει να αναγνωρίσει οπτικά κάποιας μορφής σύνδεση μεταξύ των τιμών.

Η πιο απλή μορφή συσχέτισης μεταξύ δύο παραμέτρων και γνείναι η γραμμική συσχέτιση, οι δύο παράμετροι δηλαδή να συνδέονται με μία μαθηματική σχέση της μορφής: $y = a + b \cdot x$ (19) όπου y (εξαρτημένη παράμετρος) είναι η παράμετρος η τιμή της οποίας εξαρτάται από την παράμετρο x (ανεξάρτητη παράμετρος), a είναι η τομή της ευθείας με τον άξονα y και b είναι η κλίση της ευθείας.

Με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, μπορούν να υπολογιστούν οι τιμές των συντελεστών a και b και να προσδιοριστεί η ευθεία που περιγράφει καλύτερα τη σχέση μεταξύ των δύο παραμέτρων. Ο δείκτης που εκφράζει πόσο ισχυρή είναι η συσχέτιση είναι ο συντελεστής συσχέτισης, R , ο οποίος μπορεί να πάρει τιμές στο διάστημα μεταξύ του -1 και του $+1$: τιμές του R κοντά στο μηδέν δηλώνουν απουσία συσχέτισης, ενώ τιμές του R κοντά στο $+1$ ή στο -1 δηλώνουν ισχυρή θετική ή ισχυρή αρνητική συσχέτιση αντίστοιχα (θετική συσχέτιση σημαίνει ότι αυξανόμενης της τιμής της x αυξάνεται η τιμή της y , ενώ αρνητική συσχέτιση σημαίνει ότι αυξανόμενης της τιμής της x μειώνεται η τιμή της y).

15.15. ΈΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΣΥΜΦΩΝΙΑΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΔΥΟ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

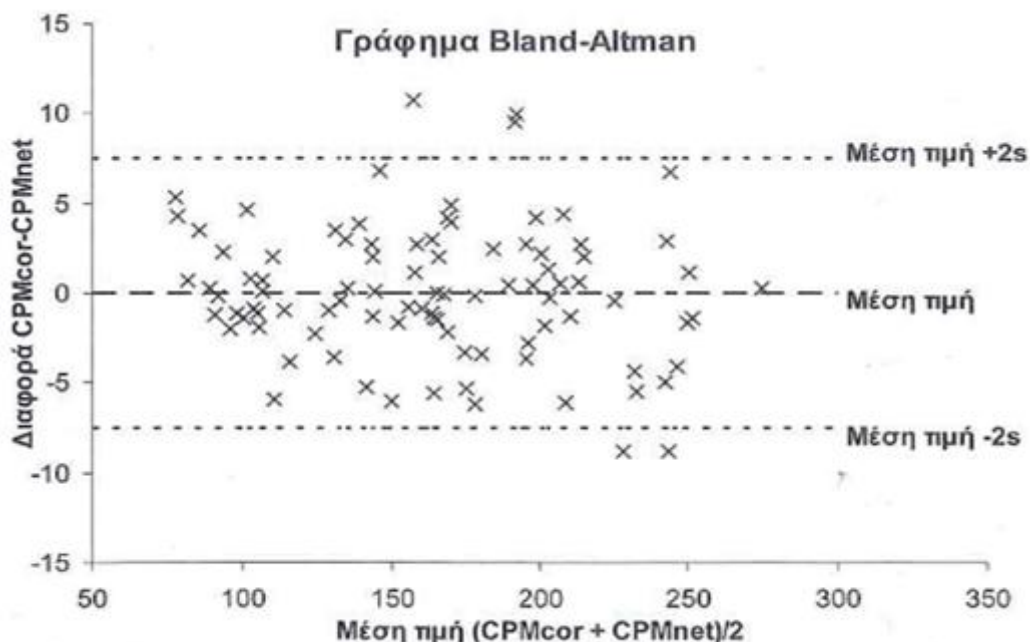
Πολλές φορές υπάρχουν στη διάθεση μας περισσότερες από μία μέθοδοι που μετρούν το ίδιο μέγεθος. Τίθεται τότε το ερώτημα εάν και κατά πόσο τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν με διαφορετικές μεθόδους είναι συγκρίσιμα (συμφωνούν) μεταξύ τους. Είναι επίσης πολύ συχνό να προτείνεται μια καινούρια μέθοδος για τη μέτρηση μιας παραμέτρου, τα αποτελέσματα της οποίας πρέπει να ελεγχθεί εάν συμφωνούν με αυτά της μέχρι τότε καθιερωμένης μεθόδου (gold standard) με τελικό στόχο την ενδεχόμενη αντικατάσταση της παλιάς μεθόδου με την καινούρια, ιδίως εάν η παλιά παρουσίαζε συγκεκριμένες δυσκολίες ή κινδύνους (π.χ. ήταν επεμβατική) ενώ η καινούρια όχι.

Η απάντηση στο ερώτημα αυτό δεν μπορεί να δοθεί εξετάζοντας απλά εάν υπάρχει συσχέτιση ανάμεσα στα αποτελέσματα των δύο μεθόδων, άλλωστε θα ήταν τουλάχιστον περιέργο να μην υπάρχει καθόλου συσχέτιση, μια και πρόκειται για μετρήσεις του ίδιου μεγέθους. Από την άλλη είναι επίσης σπάνιο οι δύο μέθοδοι να δίνουν ακριβώς ταυτόσημα αποτελέσματα, δηλαδή να συμφωνούν απόλυτα. Η ουσία του ερωτήματος βρίσκεται στο να βρεθεί κατά πόσο οι αποκλίσεις που αναπόφευκτα παρουσιάζονται ανάμεσα στα αποτελέσματα των δύο μεθόδων είναι τόσο σημαντικές ώστε να επηρεάζεται η κλινική τους ερμηνεία.

Η καταλληλότερη μέθοδος για να απαντήσει κανείς στο ερώτημα αυτό είναι αυτή που προτάθηκε από τους Bland και Altman μέσω της κατασκευής του ομώνυμου γραφήματος, στο οποίο παριστάνεται η διαφορά μεταξύ των δύο αποτελεσμάτων σε σχέση με τη μέση τιμή τους (Διάγραμμα 5). Η συμφωνία μεταξύ των μεθόδων μπορεί να εκτιμηθεί υπολογίζοντας τη μέση τιμή των διαφορών (bias) και την τυπική τους απόκλιση (s). Εάν το bias είναι σημαντικό, σημαίνει ότι η μία μέθοδος παράγει συστηματικά μεγαλύτερες ή μικρότερες τιμές από την άλλη, και αυτό μπορεί να διορθωθεί ανάλογα προσθέτοντας ή αφαιρώντας το bias από το αντίστοιχο αποτέλεσμα. Εάν η τυπική απόκλιση των διαφορών είναι τέτοια ώστε διαφορές στα αποτελέσματα στο διάστημα $\pm 2s$ να μη συνιστούν πρόβλημα στην κλινική ερμηνεία, τότε οι δύο μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιούνται εναλλακτικά.

Παράδειγμα: Δείγματα αίματος για προσδιορισμό του GFR με $^{51}\text{Cr-EDTA}$ και τα οποία είναι επιπλέον επιμολυσμένα με ποσότητα $^{99\text{mTc}}$ μετρούνται στο γ -counter. Κάθε δείγμα μετράται δύο φορές. Η πρώτη μέτρηση γίνεται ταυτόχρονα και στα δύο ενεργειακά παράθυρα (^{51}Cr και $^{99\text{mTc}}$) και εφαρμόζεται διόρθωση για cross-talk (CPMcor). Η δεύτερη μέτρηση (CPMnet) γίνεται την επόμενη ημέρα, οπότε η ενεργότητα του $^{99\text{mTc}}$ στο δείγμα έχει πέσει σε αμελητέα επίπεδα, ώστε να μην επηρεάζει τη μέτρηση στο παράθυρο του ^{51}Cr . Θέλουμε να ελέγξουμε τη συμφωνία μεταξύ των δύο μετρήσεων.

Στο Διάγραμμα 5 παρουσιάζεται το γράφημα Bland-Altman με τη διαφορά (CPMcor - CPMnet) σε σχέση με τη μέση τιμή (CPMcor + CPMnet)/2. Η μέση τιμή των διαφορών (bias=0.04cpm) κρίνεται αμελητέα. Η τυπική απόκλιση τους είναι $s=3.75$ cpm, συνεπώς το διάστημα $\pm 2s$ μέσα στο οποίο βρίσκεται το 95% των διαφορών είναι ± 7.5 cpm. Με άλλα λόγια το 95% των μετρήσεων παρουσιάζουν ασυμφωνία μεταξύ τους μικρότερη από ± 7.5 cpm, εύρος το οποίο είναι μικρότερο από το σφάλμα που έχει κάθε μέτρηση λόγω της στατιστικής φύσης του φαινομένου. Συνεπώς, η μέτρηση με τη διόρθωση για cross-talk μπορεί να χρησιμοποιείται εναλλακτικά της καθυστερημένης μέτρησης την επόμενη ημέρα.



Διάγραμμα 5: Γράφημα Bland-Altman για τον έλεγχο της συμφωνίας μεταξύ των αποτελεσμάτων δύο μεθόδων.

15.16. ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΡΟΓΝΩΣΤΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ

Κάθε διαγνωστική εξέταση έχει σαν στόχο να αποδείξει την ύπαρξη ή όχι μιας συγκεκριμένης πάθησης στον εξεταζόμενο. Υπάρχουν διάφοροι δείκτες που περιγράφουν τη διαγνωστική απόδοση μιας εξέτασης, οι πιο συνηθισμένοι από τους οποίους είναι η ευαισθησία, η ειδικότητα, η θετική και η αρνητική προγνωστική αξία και η ολική ακρίβεια.

15.17. ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ, ΕΙΔΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΟΛΙΚΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑ

Έστω ότι ένα σύνολο ατόμων που βεβαιωμένα πάσχουν από μια συγκεκριμένη πάθηση (Πάσχοντες-Π) και ένα σύνολο ατόμων που βεβαιωμένα δεν πάσχουν από τη συγκεκριμένη πάθηση (Μη Πάσχοντες-ΜΠ) υποβάλλονται σε μια διαγνωστική εξέταση. Η εξέταση παράγει θετικό αποτέλεσμα (ανιχνεύει πάθηση) σε ένα υποσύνολο Θ ατόμων από τα οποία κάποια είναι Αληθώς Θετικά (ΑΘ) και κάποια Ψευδώς Θετικά (ΨΘ). Αντίστοιχα παράγει αρνητικό αποτέλεσμα (δεν ανιχνεύει πάθηση) σε ένα υποσύνολο Α ατόμων από τα οποία κάποια είναι Αληθώς Αρνητικά (ΑΑ) και κάποια Ψευδώς Αρνητικά (ΨΑ). Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει εποπτικά το αποτέλεσμα της διαγνωστικής διαδικασίας:

	Αποτέλεσμα θετικό	Αποτέλεσμα αρνητικό	
Πάσχοντες (Π)	Αληθώς θετικό (ΑΘ)	Ψευδώς αρνητικό (ΨΑ)	
	Αποτελέσμα (+)	Αποτελέσμα (-)	Συνολα
Πάσχοντες (Π)	218 (ΑΘ)	32(ΨΑ)	250
Μη πάσχοντες (ΜΠ)	11 (ΨΘ)	29 (ΑΑ)	50
Σύνολα	229 (Θ)	71 (Α)	300
Μη Πάσχοντες	Ψευδώς θετικό (ΨΘ)	Αληθώς αρνητικο (ΑΑ)	

Πίνακας 24: Αποτέλεσμα της διαγνωστικής διαδικασίας

Η ευαισθησία (sensitivity) χαρακτηρίζει την ικανότητα της εξέτασης να ανιχνεύει την πάθηση όταν αυτή υπάρχει και ορίζεται ως το πηλίκο των Αληθώς Θετικών αποτελεσμάτων προς το σύνολο των Πασχόντων (μπορεί να εκφραστεί και σαν ποσοστό):

$$\text{Ευαισθησία} = \frac{ΑΘ}{Π} = \frac{ΑΘ}{ΑΘ+ΨΑ} \quad [15.47]$$

Η ειδικότητα (specificity) χαρακτηρίζει την ικανότητα της εξέτασης να μην ανιχνεύει πάθηση όταν αυτή δεν υπάρχει και ορίζεται ως το πηλίκο των Αληθώς Αρνητικών αποτελεσμάτων προς το σύνολο των Μη πασχόντων (μπορεί να εκφραστεί και σαν ποσοστό):

$$\text{Ειδικότητα} = \frac{ΑΑ}{ΜΠ} = \frac{ΑΑ}{ΑΑ+ΨΘ} \quad [15.48]$$

Η ολική ακρίβεια (overall curacy) χαρακτηρίζει τη συνολική ικανότητα της εξέτασης να δίνει σωστό αποτέλεσμα, τόσο θετικό όσο και αρνητικό και ορίζεται ως το πηλίκο των Αληθώς Θετικών και των Αληθώς Αρνητικών αποτελεσμάτων προς το σύνολο των εξεταζόμενων (μπορεί να εκφραστεί και σαν ποσοστό):

$$\text{Ολική Ακρίβεια} = \frac{A\theta + AA}{\Pi + \text{ΜΠ}} = \frac{A\theta + AA}{A\theta + \Psi A + AA + \Psi\theta} \quad [15.49]$$

Μία υποθετική εξέταση με ευαισθησία 1.0 (100%) στην ανίχνευση μιας συγκεκριμένης πάθησης, θα εντοπίσει με βεβαιότητα όλους τους πάσχοντες μέσα στον πληθυσμό, με άλλα λόγια εφόσον κάποιο άτομο πάσχει, το αποτέλεσμα της εξέτασης θα είναι θετικό. Δεν ισχύει όμως και το αντίστροφο: κάθε θετικό της αποτέλεσμα δεν αντιστοιχεί απαραίτητα σε πάσχοντα (τα Ψευδώς Θετικά αποτελέσματα δεν επηρεάζουν την ευαισθησία).

Αντίστοιχα, μία υποθετική εξέταση με ειδικότητα 1.0 (100%) σε μια συγκεκριμένη πάθηση, θα εντοπίσει με βεβαιότητα όλους τους μη πάσχοντες μέσα στον πληθυσμό, με άλλα λόγια εφόσον κάποιο άτομο δεν πάσχει, το αποτέλεσμα της εξέτασης θα είναι αρνητικό. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι κάθε αρνητικό της αποτέλεσμα αντιστοιχεί σε μη πάσχοντα (τα Ψευδώς αρνητικά αποτελέσματα δεν επηρεάζουν την ειδικότητα).

15.18. ΘΕΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΡΟΓΝΩΣΤΙΚΗ ΑΞΙΑ

Η ευαισθησία και η ειδικότητα αποτελούν πολύ δημοφιλείς δείκτες της διαγνωστικής ικανότητας μιας εξέτασης. Αυτό όμως που ενδιαφέρει στην κλινική πράξη, όπου το μόνο που είναι γνωστό είναι το αποτέλεσμα της εξέτασης και όχι η πραγματική κατάσταση του εξεταζόμενου, είναι η αξιοπιστία του θετικού ή του αρνητικού αποτελέσματος, η πιθανότητα δηλαδή που έχει το θετικό ή το αρνητικό αποτέλεσμα να είναι σωστό. Την πληροφορία αυτή την δίνουν η θετική και η αρνητική προγνωστική αξία.

Η θετική προγνωστική αξία-ΘΠΑ (positive predictive value-PPV) μιας εξέτασης χαρακτηρίζει την αξιοπιστία του θετικού αποτελέσματος, δηλαδή τι ποσοστό από τα θετικά αποτελέσματα είναι πράγματι πάσχοντες:

$$\text{ΘΠΑ} = \frac{A\theta}{\theta} = \frac{A\theta}{A\theta + \Psi\theta} \quad [15.50]$$

Η αρνητική προγνωστική αξία - ΑΠΑ (negative predictive value-NPV) μιας εξέτασης χαρακτηρίζει την αξιοπιστία του αρνητικού αποτελέσματος που παράγει αυτή η εξέταση, δηλαδή τι ποσοστό από τα αρνητικά αποτελέσματα είναι πράγματι μη πάσχοντες:

$$\text{ΑΠΑ} = \frac{AA}{A} = \frac{AA}{AA + \Psi A} \quad [15.51]$$

Παράδειγμα: 300 άτομα, 250 πάσχοντες και 50 μη πάσχοντες υποβάλλονται σε μια διαγνωστική εξέταση και τα αποτελέσματα ταξινομούνται στον παρακάτω πίνακα:

Η ευαισθησία της εξέτασης είναι $218/250 = 0.872$ (87.2%) και η ειδικότητα $39/50=0.78$ (78%). Η θετική προγνωστική αξία είναι $218/229=0.952$ (95.2%) και η αρνητική προγνωστική αξία είναι $39/71=0.549$ (54.9%).

Προγνωστική αξία και επιπολασμός νόσου

Οι προγνωστικές αξίες που υπολογίζονται σε μια κλινική μελέτη εξαρτώνται άμεσα από τον επιπολασμό της πάθησης στο δείγμα που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη.

Στο προηγούμενο παράδειγμα, ο επιπολασμός της πάθησης στο δείγμα ήταν $250/350=0.833$ (83.3%). Εάν μια άλλη μελέτη για την ίδια διαγνωστική εξέταση διενεργούνταν σε δείγμα 750 ατόμων, από τους οποίους οι 250 ήταν πάσχοντες και οι 500 μη πάσχοντες (επιπολασμός $250/750=0.333$ ή 33.3%), τα αποτελέσματα θα ήταν:

Σύνολο	Αποτέλεσμα(+)	Αποτέλεσμα(-)
Πάσχοντες 250 (Π)	218(ΑΘ)	32(ΨΑ)
Μη πάσχοντες 500 (ΜΠ)	110(ΨΘ)	390(ΑΑ)
ΣΥΝΟΛΟ 750	328(Θ)	422(Α)

Η ευαισθησία και η ειδικότητα παραμένουν 0.872 και 0.78 αντίστοιχα, αλλά η ΘΠΑ τώρα είναι $218/328=0.665$ (66.5%) και η ΑΠΑ είναι $390/422=0.924$ (92.4%).

Γενικά, όσο σπανιότερη είναι μια πάθηση, τόσο πιο σίγουροι μπορούμε να είμαστε ότι ένα αρνητικό διαγνωστικό αποτέλεσμα είναι πράγματι σωστό, και τόσο λιγότερο σίγουροι ότι ένα θετικό αποτέλεσμα πράγματι καταδεικνύει πάθηση. Οι σχέσεις που συνδέουν την ΘΠΑ και την ΑΠΑ με τον επιπολασμό, την ευαισθησία και την ειδικότητα είναι:

$$\Theta\text{ΠΑ} = \frac{\text{ευαισθησία} * \text{επιπολασμός}}{\text{ευαισθησία} * \text{επιπολασμός} + (1 - \text{ειδικότητα}) * (1 - \text{επιπολασμός})} \quad [15.52]$$

$$\text{ΑΠΑ} = \frac{\text{ειδικότητα} * (1 - \text{επιπολασμός})}{(1 - \text{ευαισθησία}) * \text{επιπολασμός} + \text{ειδικότητα} * (1 - \text{επιπολασμός})} \quad [15.53]$$

Όταν ο επιπολασμός μιας νόσου είναι χαμηλός, η θετική προγνωστική αξία της εξέτασης δεν θα πλησιάζει τη μονάδα, ακόμη κι αν η ευαισθησία και η ειδικότητα είναι πολύ υψηλές. Γι αυτό το λόγο, όταν μια διαγνωστική εξέταση χρησιμοποιείται για screening του γενικού πληθυσμού, είναι αναπόφευκτο πολλά θετικά ευρήματα της να είναι ψευδώς θετικά.

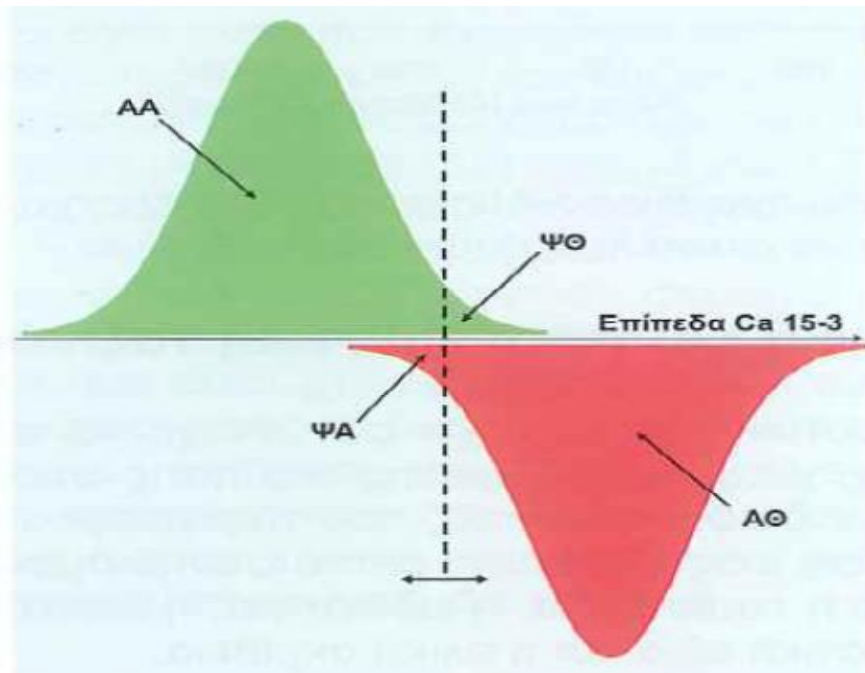
Αντίθετα, η αρνητική προγνωστική αξία μιας εξέτασης για μια νόσο με χαμηλό επιπολασμό πλησιάζει τη μονάδα ακόμη κι αν η ευαισθησία και η ειδικότητα της εξέτασης είναι χαμηλές.

15.19. ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΔΙΑΛΟΓΗΣ

Σε ολόκληρη την προηγούμενη ανάλυση θεωρήθηκε δεδομένο ότι η διαγνωστική εξέταση παράγει ένα ξεκάθαρο αποτέλεσμα, θετικό η αρνητικό. Στην κλινική πραγματικότητα, ανάμεσα στα σαφώς θετικά και στα σαφώς αρνητικά ευρήματα, υπάρχει μια «γκρίζα» περιοχή όπου το αποτέλεσμα της εξέτασης δεν είναι απόλυτο αλλά τείνει με διαφορετικό βαθμό βεβαιότητας είτε προς το θετικό είτε προς το αρνητικό. Στις περιπτώσεις αυτές πρέπει να οριστεί ένα σημείο διαλογής (cut-off) για τη διαγνωστική απόφαση: αποτελέσματα ένθεν του σημείου διαλογής θα θεωρούνται θετικά και εκείθεν αρνητικά. Είναι προφανές ότι η επιλογή του σημείου διαλογής επηρεάζει την ευαισθησία και την ειδικότητα της διαγνωστικής εξέτασης.

Παράδειγμα: Έστω ότι η μέτρηση των επιπέδων του καρκινικού δείκτη Ca15-3 στον ορό παρουσιάζει την παρακάτω κατανομή σε υγιείς γυναίκες (πράσινη καμπύλη) και σε ασθενείς με καρκίνο του μαστού (κόκκινη καμπύλη, η οποία παρουσιάζεται αντεστραμμένη μόνο για εποπτικούς λόγους). Στη συγκεκριμένη περίπτωση η κακοήθεια συνδέεται με αυξημένα επίπεδα του Ca15-3. Επειδή υπάρχει μια περιοχή όπου αλληλεπικαλύπτονται οι τιμές των υγιών και πασχουσών γυναικών, η επιλογή του σημείου διαλογής (κάθετη διακεκομμένη γραμμή) οδηγεί αναπόφευκτα σε μερικά ΨΘ και ΨΑ αποτελέσματα. Μετακίνηση του σημείου διαλογής προς χαμηλότερες τιμές (προς τα αριστερά) αυξάνει το ποσοστό των ΨΘ και μειώνει το ποσοστό των ΨΑ αποτελεσμάτων, δηλαδή μειώνει την ειδικότητα και αυξάνει την ευαισθησία της εξέτασης. Αντίθετα, μετακίνηση του σημείου διαλογής προς υψηλότερες

τιμές (προς τα δεξιά) μειώνει το ποσοστό των ΨΘ και αυξάνει το ποσοστό των ΨΑ αποτελεσμάτων, δηλαδή αυξάνει την ειδικότητα και μειώνει την ευαισθησία της εξέτασης.



Διάγραμμα 6: Η μετακίνηση του σημείου διαλογής μεταβάλλει την ευαισθησία και την ειδικότητα μιας διαγνωστικής εξέτασης (το σχήμα αποτελεί προσαρμογή αντίστοιχου σχήματος των Sardanellikαι Di Leo)

15.20. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΟΝ Η/Υ

Η εξέλιξη και η διάδοση των υπολογιστών έχει προσφέρει στον καθένα εύκολη πρόσβαση σε εξαιρετικά εξελιγμένα προγράμματα στατιστικής επεξεργασίας και ανάλυσης. Αυτό δυστυχώς δεν απαλλάσσει το χρήστη από την ανάγκη να γνωρίζει τις βασικές αρχές και μεθοδολογίες της στατιστικής ανάλυσης ώστε να μπορεί να επιλέγει κάθε φορά, ανάλογα με το είδος των δεδομένων του, τα κατάλληλα στατιστικά τεστ, να ερμηνεύει σωστά τα αποτελέσματα και να εξαγάγει τα σωστά συμπεράσματα. Στο διαδίκτυο μπορεί κανείς να βρει εύκολα λίστες με συγκριτικά στοιχεία για διάφορα στατιστικά πακέτα. Ένα από τα περισσότερο διαδεδομένα στατιστικά προγράμματα για το χώρο της υγείας είναι το SPSS, για τη χρήση του οποίου κυκλοφορούν αρκετά βιβλία και εγχειρίδια. Ενδεικτικά παρατίθενται μερικά στην βιβλιογραφία.

16. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΑΡΧΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΙΑΤΡΙΚΗ

16.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η απεικόνιση, γενικά, ασχολείται, με την αποτύπωση της μορφολογίας ή της λειτουργίας αντικειμένων τα οποία, συνήθως δεν είναι προσιτά σε απ' ευθείας οπτική θεώρηση. Τέτοια αντικείμενα αφορούν τη βιοιατρική απεικόνιση, τη μικρογραφία μορίων ή κρυστάλλων, την απεικόνιση στο διάστημα και στην ραδιοαστρονομία, κ.ά..

Στην ιατρική διάγνωση, οι απεικονιστικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται πρωταρχικά για μορφολογικές και λειτουργικές μελέτες. Μια απεικονιστική μέθοδος καθορίζεται από το είδος της ακτινοβολίας το οποίο χρησιμοποιεί και από το απεικονιστικό σύστημα με το οποίο εφαρμόζεται. Υπάρχει ένα μεγάλο εύρος μεθόδων και τεχνικών και ακόμη, για δεδομένη εφαρμογή, δεν υπάρχει απαραίτητα η «βέλτιστη εκλογή». Μια τέτοια επιλογή, πολλές φορές είναι δύσκολη.

16.2. ΙΑΤΡΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ

Οι απεικονιστικές μέθοδοι εκμεταλλεύονται την ακτινοβολία σε μια από τις τρεις τεχνικές: α) την τεχνική διάδοσης β) την τεχνική εκπομπής και γ) την τεχνική σκέδασης.

Οι τεχνικές διάδοσης εξαρτώνται από τη διαφοροποίηση της απορρόφησης της χρησιμοποιούμενης ακτινοβολίας. Για την ερμηνεία της εικόνας και την εξαγωγή ποσοτικών πληροφοριών, απαραίτητο είναι, οι μηχανισμοί εξασθένησης της ενέργειας και οι φυσικοί παράμετροι οι οποίες την προκαλούν να γίνουν κατανοητοί.

Οι τεχνικές εκπομπής βασίζονται στην εξωτερική ανίχνευση εσωτερικά εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Καθώς η ακτινοβολία διέρχεται το υλικό μέσο, από το σημείο εκπομπής στον ανιχνευτή, συμβαίνουν φυσικές αλληλεπιδράσεις (ακτινοβολίας - ύλης) όπως απορρόφηση και σκέδαση. Για ποσοτική αξιολόγηση των απεικονίσεων με τεχνικές εκπομπής είναι απαραίτητη η ανίχνευση της ακτινοβολίας μέσα από πολλαπλές εικόνες.

Οι τεχνικές σκέδασης αποκωδικοποιούν τις πληροφορίες τις οποίες μεταφέρει η σκεδαζόμενη, σε υλικό, ακτινοβολία και χρησιμοποιούνται κυρίως στις απεικονίσεις του εσωτερικού του σώματος με υπερήχους.

16.3. ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΤΗΝ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΙΑΤΡΙΚΗ

Στην Ιατρική, η απεικόνιση με τις τεχνικές εκπομπής μας εφοδιάζει με φυσιολογικές πληροφορίες. Δυναμικές (λειτουργικές) μελέτες οι οποίες είναι δυνατόν να παρακολουθήσουν το μεταβολισμό του ραδιοφαρμάκου (ρφ) και να εξαχθούν χρήσιμες μεταβολικές παράμετροι.

Ιδανική τεχνική διάγνωσης μιας ασθένειας είναι αυτή που επιτυγχάνεται με απραυματική μεθοδολογία. Η Πυρηνική Ιατρική χρησιμοποιεί διαγνωστικές μεθόδους οι οποίες πλησιάζουν την ιδανική.

Σκοπός της ραδιοϊσοτοπικής απεικόνισης είναι να δημιουργηθεί μια εικόνα η οποία αντιστοιχεί στη θέση και τον τρόπο που καθηλώθηκε το ρφ μετά τη χορήγηση του στον εξεταζόμενο. Η εικόνα αυτή είναι η προβολή (δυσδιάστατη εικόνα) της τρισδιάστατης κατανομής της ραδιενέργειας. Σήμερα εφαρμόζεται η τρισδιάστατη ανακατασκευή και μορφοποίηση ενός οργάνου σε «πραγματική» απεικόνιση.

Το εύρος των ενεργειών των γ-ακτίνων στις διάφορες εφαρμογές είναι περίπου 70-450 keV (ή φωτόνια εξαύλωσης) 511 keV στην απεικόνιση με ποζιτρόνια - PET. Ακτίνες οι οποίες μεταφέρουν ενέργειες όπως οι παραπάνω, είναι αρκετά διεισδυτικές, διαπερνούν τους ιστούς του σώματος και ανιχνεύονται ακόμη και από όργανα σε βάθος. Παράλληλα όμως θωρακίζονται αρκετά εύκολα με μικρά σχετικά πάχη Pd (της τάξεως των ολίγων mm).

16.4. ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΗΝ ΠΟΡΕΙΑ ΤΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΙΑΤΡΙΚΗ

Η ανάπτυξη της Πυρηνικής Ιατρικής άρχισε το 1940 όταν έγινε προσπάθεια ποσοτικού προσδιορισμού του ιωδίου-131 το οποίο έχει προσληφθεί από το θυρεοειδή. Ο μόνος πρακτικά διαθέσιμος ανιχνευτής εκείνη την εποχή, για τη μέτρηση της ενέργειας του, ήταν ο μετρητής Geiger-Muller.

Το 1948 φωτοπολλαπλασιαστές ανίχνευαν σπινθηρισμούς οι οποίοι δημιουργούντο από ηλεκτρόνια, e^- , εκπεμπόμενα από τη φωτοκάθοδο τους. Σύντομα αυτοί μαζί με ανιχνευτές αποτέλεσαν δίδυμο ανίχνευσης γ-ακτινοβολίας. Η εισαγωγή βελτιωμένου ανιχνευτικού συστήματος και η ανάγκη για αυτόματη καταγραφή μετρήσεων οδήγησαν στην κατασκευή του πρώτου σπινθηρογράφου, το 1950. Τα πρώτα μοντέλα χρησιμοποιούσαν μια ράβδο βολφραμιούχου ασβεστίου σαν ανιχνευτή και μολύβδινο κατευθυντήρα μιας οπής για τον περιορισμό της ακτινοβολίας. Εκείνη την εποχή, ερμητικά κλειστοί κρύσταλλοι ιωδιούχου νατρίου ενεργοποιημένοι με προσμίξεις Θαλλίου NaI (Tl) δόθηκαν στο εμπόριο και αμέσως πήραν τη θέση του ανιχνευτού στον σπινθηρογράφο.

Ακολούθησε η κατασκευή εστιασμένων κατευθυντήρων πολλών οπών. Αυτή η σημαντική ανάπτυξη έδωσε υψηλότερη ευαισθησία και επομένως τα πλεονεκτήματα της χρήσης μικρότερης χορηγούμενης δόσης, μικρότερου χρόνου σάρωσης και καλύτερης ποιότητας της εικόνας. Στις αρχές της δεκαετίας του 50 φάνηκε ότι ήταν δυνατόν να χρησιμοποιηθεί το σπινθηρογράφημα και για άλλα κλινικά προβλήματα πέρα από τη διάγνωση του θυρεοειδούς. Ο κολλοειδής χρυσός-198 (Au-198) χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά για την απεικόνιση του ήπατος αλλά σύντομα αντικαταστάθηκε λόγω της μεγάλης γ-ακτινοβολίας την οποία εκπέμπει (412KeV).

Οι προσπάθειες για τη βελτίωση της εικόνας οδήγησαν στην κατασκευή του «φωτοσπινθηρογράφου». Αυτός είχε ένα φωτογραφικό καταγραφικό σύστημα και επετύγχανε την αφαίρεση του ανεπιθύμητου υποστρώματος και την αύξηση της αντίθεσης της εικόνας. Η εικόνα αποτυπώνεται σε ακτινογραφικό φιλμ και έδειχνε να μεταφέρει περισσότερες πληροφορίες απ' ότι το σπινθηρογράφημα πάνω σε αδιαφανές χαρτί.

Το 1957, ο Anger περιέγραψε μια κάμερα σπινθηρισμών η οποία βελτίωνε πάρα πολύ τη συλλογή γ-φωτονίων με τη χρήση κατευθυντήρα παράλληλων οπών και με την οποία απεικονίζεται πολύ μεγαλύτερη επιφάνεια της κατανομής της ραδιενέργειας. Η ικανότητα αυτής ν' απεικονίσει ένα όργανο ολόκληρο σε μία λήψη μείωσε το χρόνο παραγωγής της εικόνας και εισήγαγε τη πιθανότητα δυναμικής απεικόνισης (εικόνες του οργάνου σε

διαδοχικές χρονικές στιγμές). Η Angerκάμερα (γ-κάμερα), όταν αρχικά χρησιμοποιούσε κρύσταλλο πάχους μισής ίντσας, είχε χαμηλή απόδοση ανίχνευσης και διακριτική ικανότητα συγκρινόμενη με το σπινθηρογράφο, ο οποίος χρησιμοποιούσε κρύσταλλο δύο ιντσών. Σύντομα ο γραμμικός σπινθηρογράφος έχασε τη δημοτικότητα του μετά τη βελτίωση των φυσικών παραμέτρων της γ-κάμερα.

Η παραγωγή του τεχνητίου-99m και τα φυσικά του χαρακτηριστικά (140keV-όχι πολύ υψηλή ενέργεια και δεν απαιτεί μεγάλο πάχος κρυστάλλου) συμβάλλουν στην επικράτηση της γ-κάμερα. Σήμερα σύγχρονοι ανιχνευτές ημιαγωγοί βρίσκουν εφαρμογή σε υβριδικά συστήματα γ-κάμερα και εξειδικευμένα συστήματα απεικόνισης της καρδιάς ή του μαστού. Το σύστημα της γ-κάμερα απέκτησε περιστροφή και έγινε δυνατή η τομογραφική ανίχνευση των οργάνων με μονοενεργειακή τομογραφία εκπομπής (SinglePhotonEmissionTomography, SPET). Η αύξηση των κεφαλών ανίχνευσης της γ-κάμερα σε 2 ή 3 μείωσε σημαντικά τον χρόνο εξέτασης.

Στα τέλη της δεκαετίας του '70 κατασκευάστηκε η ποζιτρονική τομογραφική κάμερα (positron emission tomography, PET) για τη καταγραφή τομογραφικών εικόνων, από την κατανομή ισοτόπου εκπομπής ποζιτρονίου μέσα στο υπό έλεγχο όργανο.

16.5. ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΣΠΙΝΘΗΡΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ. Η ΠΡΟΒΟΛΙΚΗ Γ-ΚΑΜΕΡΑ

16.5.1. Κρύσταλλοι-Ανιχνευτές

Η απλούστερη μορφή απεικόνισης στην Πυρηνική Ιατρική είναι η προβολική απεικόνιση. Αναπαριστά την προβολή της κατανομής του ρφ στον εξεταζόμενο. Κρύσταλλοι-Ανιχνευτές. Ένας ή περισσότεροι, μεγάλης διαμέτρου ανιχνευτές-κρύσταλλοι (NaI(Tl)), πάχους 3/8 ή 1/2 ή 5/8 της ίντσας ή αντίστοιχα 8.5mm, 9.5mm, 12.5mm, αποτελούν το κεντρικό τμήμα της γ-κάμερα, στην ανίχνευση των φωτονίων τα οποία εκπέμπονται από το εξεταζόμενο όργανο.

Ο κρύσταλλος χαρακτηρίζεται από το φαινόμενο του φθορισμού σύμφωνα με το οποίο φωτόνια-γ μετατρέπονται σε ορατά φωτόνια. Ο αριθμός των φωτονίων τα οποία παράγονται από τον κρύσταλλο-σπινθηριστή είναι ανάλογος προς την ενέργεια των προσπιπτόντων σε αυτόν φωτονίων γ. Η ευαισθησία του κρυστάλλου εξαρτάται και από το πάχος του. Κρύσταλλοι με μεγαλύτερο πάχος ανιχνεύουν περισσότερα και υψηλότερης ενέργειας φωτόνια. Μειώνεται, όμως η διακριτική ικανότητα σε σχέση με αυτήν κρυστάλλων μικρότερου πάχους.

Για τη βέλτιστη λειτουργία των συστημάτων απεικόνισης, οι κρύσταλλοι ανιχνευτές θα πρέπει να έχουν: α) Υψηλή απόδοση ανίχνευσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, δηλ. ο ατομικός αριθμός και η πυκνότητα του κρυστάλλου να είναι υψηλά ώστε να ενισχύουν την πιθανότητα αλληλεπίδρασης. β) Να μετατρέπει την ενέργεια της απορροφηθείσας ακτινοβολίας σε ανιχνεύσιμο φως με υψηλή απόδοση, δηλ. πλούσια έξοδο φωτονίων φωτός. Η απόδοση του φωτός να είναι ανάλογη της εναποτιθέμενης ενέργειας. γ) Το υλικό του κρυστάλλου να είναι διαφανές. δ) Το φως να εξασθενεί ταχέως ώστε να επιτρέπεται η διάκριση συμβάντων (κρούσεων) σε περίπτωση υψηλού ρυθμού κρούσεων όταν το ραδιοϊσότοπο είναι πλούσιο στην ανιχνευόμενη περιοχή. Δηλαδή ο νεκρός χρόνος (deadtime) απόκρισης να είναι μικρός. Όσο μικρότερος είναι ο νεκρός χρόνος του συστήματος τόσο λιγότερες οι απώλειες ανίχνευσης.

Η εσωτερική απόδοση του κρυστάλλου εκφράζει το κλάσμα (ποσοστό) της ακτινοβολίας το οποίο αλληλοεπιδρά με τον κρύσταλλο. Κάθε κρύσταλλος ο οποίος παράγει φθορισμό κατά τη δράση της ακτινοβολίας σε αυτόν έχει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά πυκνότητας, μήκους κύματος εκπομπής, απόδοσης φωτός και χρόνου αποδιέγερσης. Οι κρύσταλλοι NaI (TI) έχουν υψηλό ατομικό αριθμό Z , υψηλή πυκνότητα ρ και υψηλό γραμμικό συντελεστή απορρόφησης στην ενέργεια των 150keV. Παρουσιάζει, δηλαδή, καλή απόδοση για φωτόνια ενεργειών 150keV έχοντας και την καλύτερη διακριτική ικανότητα (10%-12%) σε αυτές τις ενέργειες.

Το φάσμα εκπομπής είναι κοντά στα 410nm(πράσινο-μπλε) δηλ. ο ίδιος ο κρύσταλλος είναι διαφανής στα φωτόνια σπινθηρισμού τα οποία παράγει και η φασματική κατανομή τους είναι μέσα στα όρια ευαισθησίας των συνήθων τύπων φωτοκαθόδου. Ο χρόνος αποδιέγερσης του κρυστάλλου NaI (TI) είναι μερικών εκατοντάδων nm, ώστε να επιτυγχάνονται υψηλοί ρυθμοί καταμέτρησης. Είναι, όμως, οι κρύσταλλοι-σπινθηριστές NaI (TI) εύθραυστοι και υγροσκοπικοί με αποτέλεσμα να υπάρχουν κατασκευαστικές δυσκολίες στην παραγωγή κρυστάλλων μεγάλης διαμέτρου. Προστατεύονται από την υγρασία και τη μηχανική βλάβη με κέλυφος αλουμινίου (Al), με πάχος < 1mm. Είναι κυρίως παραλληλογράμμου σχήματος, σήμερα, ενώ υπάρχουν πολλά παλαιότερα συστήματα με κυκλικό ανιχνευτή.

Η επιφάνεια εισόδου καθώς και οι πλευρικές επιφάνειες περιβάλλονται από κατάλληλο ανακλαστικό υλικό, ώστε να ανακλώνται προς το εσωτερικό του κρυστάλλου όσα φωτόνια τείνουν να διαφύγουν. Στη γ -κάμερα με κεφαλή πολλών [pixelate] εν σειρά κρυστάλλων, το φως των σπινθηρισμών περιορίζεται σε κάθε κρύσταλλο και εστιάζεται σε ένα σημείο στο φωτοανιχνευτικό σύστημα βελτιώνοντας έτσι σημαντικά τη διακριτική ικανότητα του συστήματος (φωτοανίχνευση ανά θέση).

16.5.2. Νεότεροι κρύσταλλοι ανιχνευτές και φωτοανιχνευτές στερεάς κατάστασης-ημιαγωγοί

Ανιχνευτές cadmium zinc telluride (CZT) και cadmium telluride (CdTe): είναι ημιαγωγοί άμεσης μετατροπής. Η πυκνότητα του CZT είναι 5.8g/cm^3 . Η πυκνότητα και ο υψηλός ενεργός ατομικός αριθμός ($Z_{\text{eff}} \sim 50$) του δίνουν την υψηλή δύναμη ανάσχεσης, δηλ. απώλεια μέσης ενέργειας στη μονάδα μήκους (MeV/cm) για τις τυπικές ενέργειες χρήσιμες στη SPET-με γραμμικό συντελεστή εξασθένησης μεγαλύτερο αυτού του NaI (TI). Η περιεκτικότητα σε ψευδάργυρο ποικίλλει και περιλαμβάνει, συχνά, ίχνη άλλων στοιχείων, υλικών πρόσμιξης, για τη βελτίωση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του.

Ο κρύσταλλος κόβεται σε μικρά ίσα τμήματα, και οι μεταλλικές επαφές, οι οποίες καταλήγουν σε αυτούς τους μικρούς κρυστάλλους, εφαρμόζονται στην επιφάνεια για να εξάγουν τα ηλεκτρικά σήματα από τον ανιχνευτή. Τελικά συνδέεται με το ηλεκτρονικό σύστημα, και γίνεται ένας πλήρης ανιχνευτής αποτελούμενος από πλήθος κρυστάλλων διαστάσεων συνήθως $(3 \times 3)\text{mm}^2$.

Σε έναν ανιχνευτή άμεσης μετατροπής, χωρίς την εφαρμογή φωτοπολλαπλασιαστών, όπως ένας κρύσταλλος CZT, η ακτινοβολία εναποθέτει την ενέργεια σε ένα σημείο στο πλέγμα της δομής του κρυστάλλου με αποτέλεσμα την παραγωγή ζευγών φορτισμένων σωματιδίων κατά τα φαινόμενα της αλληλεπίδρασης φωτονίων και ύλης. Με την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου τα αρνητικά φορτισμένα σωματίδια των ζευγών προκαλούν έναν παλμό ρεύματος στην άνοδο της συσκευής. Η ενεργειακή διακριτική ικανότητα (ΔI) του CZT είναι μέχρι και 5 φορές καλύτερη από αυτήν του κρυστάλλου NaI στα 140 keV. Οι σπινθηριστές CZT παρουσιάζουν άριστη ενεργειακή ΔI αλλά κρύσταλλοι ιωδιούχου καισίου CsI (TI) έχουν συγκρίσιμη ευαισθησία και ΔI εικόνας με πολύ μειωμένο κόστος.

Το 2000 η εταιρία Digiradέδωσε την πρώτη γ-κάμερα Digiradergo με ανιχνευτή στερεάς κατάστασης, σε φορητή γ-κάμερα με ανιχνευτή 40 cm x 30cm αποτελούμενο από 11520 στοιχεία CsI (TI) διαστάσεων (3 x 3)mm² και πάχος 6mm σε επαφή με φωτοδιόδους πυριτίου. Εν συνεχεία η εταιρεία εφάρμοσε τους κρυστάλλους στερεάς κατάστασης ημιαγωγούς CsI (TI) ιδιαίτερα για τη SPET απεικόνιση του μυοκαρδίου στο σύστημα Cardius XPO με 1,2 ή 3 κεφαλές ανίχνευσης.

Φωτοανιχνευτές στερεάς κατάστασης. Βελτίωση του συστήματος της κεφαλής της PET (ή της SPET) είναι η αντικατάσταση των φωτοπολλαπλασιαστών με φωτοανιχνευτές στερεάς κατάστασης όπως pinφωτοδίοδος ή διάταξη φωτοδίοδων χιονοστιβάδων (avalanche photo diode, APD).

Η σχηματική μονάδα αποτελείται από διάταξη οπτικά μονωμένων κρυστάλλων-σπινθηριστών CsIμε προσμίξεις Θαλλίου (TI), (3 x 3x 5)mm³ συζευγμένη με διάταξη φωτοδίοδων στερεάς κατάστασης APD, αντικαθιστώντας τους κλασσικούς φωτοπολλαπλασιαστές (PMT). Όταν φωτόνια ενέργειας 140 keV αλληλεπιδρούν με κάποιο από τα στοιχεία της διάταξης των σπινθηριστών, το φως σπινθηρισμού ανιχνεύεται από αντίστοιχο σημείο της διάταξης φωτοανιχνευτών (φωτοδίοδοι APD), με συνέπεια τη βελτίωση των φυσικών παραμέτρων της τομογραφικής γ-κάμερας (SPET). Οι φωτοδίοδοι APD με υψηλή απόδοση και συμπαγή κατασκευή δεν έχουν τα μειονεκτήματα των PMTαλλά υστερούν λόγω αύξησης του θορύβου και χειρότερης χρονικής ΔΙ αυτής των PMT.

Νέοι φωτοπολλαπλασιαστές πυριτίου (SiPM) προσφέρουν εναλλακτική λύση συνδυάζοντας πολλά από τα πλεονεκτήματα των PMTκαι των φωτοδίοδων APD. Είναι ουσιαστικά διάταξη πολύ μικρών APD(ονομάζονται micropixels). Οι φωτοδίοδοι APDδίδουν στην έξοδο τους σήμα ανάλογο του αριθμού των φωτονίων-σπινθηρισμών και επομένως ανάλογο και των γ-φωτονίων. Έχουν υψηλή ενίσχυση και άριστη ενεργειακή και χρονική Δ.Ι. Είναι ταχύτερες μονάδες ικανές να ανταποκρίνονται σε κλάσματα των nanoseconds χαρακτηριστικό απαραίτητο στις εφαρμογές χρόνου πτήσης - time off light (ToF) και δεν είναι ευαίσθητες στα μαγνητικά πεδία.

Οι φωτοανιχνευτές στερεάς κατάστασης όπως οι APD και SiPMείναι ευαίσθητοι στις υψηλές θερμοκρασίες άνω των 70°C. Με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει ο θόρυβος και η ενίσχυση μειώνεται επηρεάζοντας αρνητικά την σχέση σήματος και θορύβου. Η χρήση αυτών επί μακρόν, σε υψηλές θερμοκρασίες μειώνει την απόδοση τους.

Η επιτυχής ανάπτυξη των οικονομικών, αξιόπιστων σειρών φωτοανιχνευτών στερεάς κατάστασης αλλάζει σημαντικά τις απαιτήσεις για τους σπινθηριστές στη SPET και PE. Η απόδοση των στερεάς κατάστασης φωτοανιχνευτών είναι σημαντικά υψηλότερη από τους φωτοπολλαπλασιαστές (PMT) (>80% αντί 25%), ώστε οι περιορισμοί στην ενεργειακή διακριτική ικανότητα από τη στατιστική καταγραφής των σπινθηρισμών μειώνονται και επιτυγχάνεται καλύτερη ενεργειακή διακριτική ικανότητα. Σήμερα, χρησιμοποιούνται κυρίως σε ειδικά συστήματα SPET ή PET απεικόνισης μαστού ή μυοκαρδίου καθώς και στα υβριδικά συστήματα με MRI.

16.6. ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΗΡΕΣ

Για να σχηματισθεί η ραδιοισοτοπικής εικόνα, είναι απαραίτητο να φθάσουν μόνο οι ακτίνες-γ οι οποίες εκπέμπονται στην κάθετη κατεύθυνση από την πηγή-όργανο στον κρύσταλλο-ανιχνευτή. Οι ακτίνες-γ δεν εστιάζονται, και σύστημα «φακών» παρόμοιο με αυτό των φωτογραφικών τεχνικών δεν μπορεί να εφαρμοσθεί. Απεικονιστικά συστήματα με γ-ακτίνες χρησιμοποιούν «απορροφητικούς» κατευθυντήρες.

Ένας μολύβδινος κατευθυντήρας στέλνει την εικόνα της κατανομής των ακτινών-γ της πηγής στον κρύσταλλο – ανιχνευτή επιτρέποντας μόνο γ-ακτίνες με συγκεκριμένη κατεύθυνση να φθάσουν σε αυτόν. Ακτίνες-γ προς άλλη κατεύθυνση (σκεδαζόμενες ακτίνες) απορροφώνται από τα μολύβδινα διαφραγματικά (septa) του κατευθυντήρα πριν φθάσουν στον ανιχνευτή. Επίσης ο κατευθυντήρας ορίζει το γεωμετρικό πεδίο της εικόνας της γ-κάμερα. Εντούτοις, αυτή η τεχνική είναι μη αποδοτική διότι σταματά μεγάλο μέρος της χρήσιμης ακτινοβολίας στη διαδρομή της προς τον ανιχνευτή. Οι κατευθυντήρες επηρεάζουν την ενεργειακή Δ.Ι την χωρητική Δ.Ι και την ευαισθησία του συστήματος.

Κατευθυντήρας μιας οπής (pinhole). Αποτελείται από πολύ μικρό άνοιγμα σε μολύβδο ή άλλο μέταλλο το οποίο δημιουργείται σε μολύβδινο κώνο, συνήθως 20-25cm από τον ανιχνευτή. Το μέγεθος της οπής μπορεί να αλλάζει και είναι διαμέτρου ολίγων mm. Οι ακτίνες-γ περνώντας από τον κατευθυντήρα οπής προβάλλουν την εικόνα της κατανομής του ραδιοϊσοτόπου πάνω στον κρύσταλλο-ανιχνευτή, ανεστραμμένη. Η εικόνα μεγεθύνεται αν η απόσταση από την πηγή στον κατευθυντήρα είναι μικρότερη από το μήκος του κώνου και μικραίνει όταν η πηγή είναι πολύ μακρύτερα. Το μέγεθος της εικόνας και του αντικειμένου (πηγής) σχετίζονται. Οι κατευθυντήρες μιας οπής χρησιμοποιούνται κυρίως για την απεικόνιση, υπό μεγέθυνση, μικρών οργάνων (π.χ. θυρεοειδής αδένας). Επίσης χρησιμοποιούνται στην απεικόνιση αρθρώσεων, σπονδύλων και σε περιπτώσεις στις οποίες απαιτείται πολύ καλή διακριτική ικανότητα μικρών δομών.

Κατευθυντήρες πολλαπλών οπών. Οπές παράλληλες, συγκλίνουσες ή αποκλίνουσες δημιουργούνται στο μολύβδινο κατευθυντήρα με μολύβδινα τοιχώματα μεταξύ των οπών-διαφράγματα-(septa). Το πάχος των septa επιλέγεται έτσι ώστε να εμποδίζουν την διάδοση των ακτινών-γ από τη μία οπή στην άλλη. Ο κατευθυντήρας με παράλληλες οπές είναι ο τύπος κατευθυντήρα που χρησιμοποιείται περισσότερο απ' όλους τους άλλους. Λιγότερο συχνά χρησιμοποιούνται οι συγκλίνοντες και οι αποκλίνοντες κατευθυντήρες.

Ο συγκλίνων κατευθυντήρας προκαλεί μεγέθυνση του απεικονιζόμενου οργάνου αυξάνοντας και τη χωρική διακριτική ικανότητα του συστήματος της γ-κάμερα. Είναι χρήσιμος στην απεικόνιση μικρών οργάνων. Οι συγκλίνοντες κατευθυντήρες, έχουν οπές που συγκλίνουν σε σημείο ή σε γραμμή μπροστά από την κεφαλή, έτσι δημιουργούν πεδίο που στενεύει με την αύξηση της απόστασης από τον κατευθυντήρα, ενώ όργανα, μεταξύ του κατευθυντήρα και του σημείου ή γραμμής σύγκλισης, μεγεθύνονται. Το πλεονέκτημα τους είναι η βελτίωση της ευαισθησίας και της διακριτικής ικανότητας της τομογραφίας. Χρησιμοποιούνται σε συστήματα πολλών κεφαλών για την καταγραφή των εικόνων διάδοσης σε κλινικά λογικό χρόνο και με σχετικά χαμηλής ενεργότητας πηγές.

Στον αποκλίνοντα κατευθυντήρα οι οπές αποκλίνουν και έχει τη δυνατότητα να βλέπει μεγαλύτερο πεδίο σε σχέση με το μέγεθος του κρυστάλλου με αποτέλεσμα τη σμίκρυνση του απεικονιζόμενου οργάνου. Είναι, πολλές φορές, απαραίτητος για την απεικόνιση των λοβών του πνεύμονα. Ο κατευθυντήρας χαρακτηρίζεται από διάφορες παραμέτρους, όπως το είδος του υλικού, από το οποίο αποτελείται [μολύβδο (Pb) ή βολφράμιο (W)], το μέγεθος και το μήκος των οπών, το πάχος των τοιχωμάτων και το σχεδιασμό των οπών.

Προσοχή απαιτείται κατά την μεταφορά ή χρήση των κατευθυντήρων για τη διατήρηση αυτών σε κατασκευαστικά άριστη κατάσταση και αποφυγή παραμόρφωσης των οπών.

16.7. ΦΩΤΟΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΤΕΣ-PHOTOMULTIPLIERTUBE (PMT)

Σε ένα απεικονιστικό σύστημα ο φωτοπολλαπλασιαστής (photo multiplier tube, PMT) συνδέεται με τον κρύσταλλο-σπινθηριστή του οποίου τους φωτεινούς παλμούς μετατρέπει σε έντονο ρεύμα ηλεκτρονίων.

Οι PMT είναι ηλεκτρονικά συστήματα τα οποία προκαλούν αύξηση των παραγόμενων ηλεκτρονίων στην φωτοκάθοδο, όταν φωτόνια ορατού φωτός από τον κρύσταλλο-ανιχνευτή προσπέσουν σε αυτήν. Ενισχυμένα τα ηλεκτρόνια από σειρά δυνόδων εντός του PMT προκαλούν παλμό τάσεως στην έξοδο του PMT ανάλογο προς την ένταση των προσπιπτόντων φωτονίων. Τα παραγόμενα φωτοηλεκτρόνια εστιάζονται με κατεύθυνση την πρώτη δύνοδο. Λόγω της ύπαρξης θετικού δυναμικού, τα φωτοηλεκτρόνια όταν προσπίπτουν στην πρώτη δύνοδο, έχουν ήδη κερδίσει αρκετή ενέργεια ώστε να προκαλέσουν την εκπομπή δευτερευόντων ηλεκτρονίων από τη δύνοδο. Το ίδιο φαινόμενο επαναλαμβάνεται, στις επόμενες δυνόδους.

Από δύνοδο σε δύνοδο ο αριθμός των δευτερευόντων ηλεκτρονίων πολλαπλασιάζεται και φθάνει στην άνοδο του PMT ένας παλμός αποτελούμενος από περίπου 1 εκατομμύριο ηλεκτρόνια. Ο παλμός εξόδου του PMT οδηγείται στον αντίστοιχο προενισχυτή για ενίσχυση. Μεγάλος αριθμός PMT-61 ή 48-εφάπτεται «οπτικά» στη οπίσθια όψη του κρυστάλλου. Επειδή ο δείκτης διάθλασης του κρυστάλλου NaI (TI) είναι αρκετά υψηλός, μεταξύ της επιφάνειας εξόδου του κρυστάλλου και των PMT, υπάρχει ο οδηγός φωτός, ο οποίος είναι διαφανής και με κατάλληλο δείκτη διάθλασης με σκοπό την καλύτερη οπτική σύζευξη κρυστάλλου και των PMT.

Ο οδηγός φωτός (lightguide ή lightpipe) είναι ένα στρώμα πλαστικού υλικού μεταξύ κρυστάλλου και PMT. Το στρώμα αυτό έχει πάχος μεγαλύτερο από 1cm και διευκολύνει τη συλλογή όσο το δυνατό περισσότερων φωτονίων φθορισμού από τους PMT. Τα φωτόνια κατά την είσοδο τους στον οδηγό φωτός προσανατολίζονται καλύτερα προς τις φωτοκαθόδους των PMT και ελαχιστοποιούνται οι απώλειες. Στις επαφές του οπτικού αγωγού με τους PMT τοποθετείται σιλικόνη για αποφυγή δημιουργίας φυσαλίδων αέρος.

Οι PMT έχουν διάμετρο μερικών cm και είναι κυλινδρικοί, εξαγωνικοί ή τετράγωνοι τοποθετημένοι ανάλογα με το σχήμα του κρυστάλλου σε κυκλική ή παραλληλόγραμμη διάταξη. Ο κρύσταλλο-ανιχνευτής και το σύστημα PMT σφραγίζονται σε περίβλημα για προστασία από το φως.

Τα σήματα από τους PMT προστίθενται. Ο τελικός παλμός έχει πλάτος ή ένταση ανάλογη με την απορροφούμενη ενέργεια στον κρύσταλλο και ανάλογη με την ενέργεια των προσπιπτόντων φωτονίων. Ο παλμός αυτός ονομάζεται Z παλμός ή παλμός ενέργειας και μεταβιβάζεται ταυτόχρονα από τους PMT σε ηλεκτρονικό σύστημα από το οποίο υπολογίζονται οι δύο συντεταγμένες θέσης X,Y του κάθε παλμού. Πριν τη δημιουργία της εικόνας, θα πρέπει να διορθωθεί το ηλεκτρικό σήμα για παραμορφώσεις εγγενείς του ανιχνευτικού συστήματος της γ-κάμερα. Τα σύγχρονα συστήματα γ-κάμερα έχουν την δυνατότητα να κάνουν διορθώσεις, στην ενέργεια, ομοιογένεια ή γραμμικότητα. Τα δεδομένα μπορούν να ψηφιοποιηθούν και να αποθηκευτούν σε υπολογιστή για ανάλυση και βελτίωση.

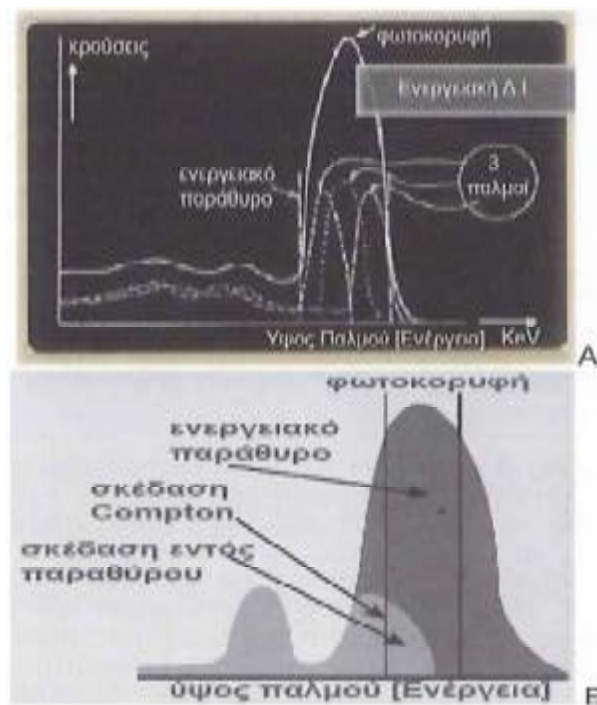
Τα συστήματα με παραλληλόγραμμο ανιχνευτή και τετραγωνικούς PMT δίδουν ταυτόχρονα καλή χωρική ΔΙ, γραμμικότητα και ομοιογένεια.

16.8. ΑΝΑΛΥΤΗΣ ΨΥΦΟΥΣ ΠΑΛΜΩΝ-PULSE HEIGHT ANALYSER (PHA)

Η μετατροπή φωτεινών παλμών σε ηλεκτρικούς παλμούς προσφέρει πλεονεκτήματα στο απεικονιστικό σύστημα της γ-κάμερα διότι είναι δυνατό να μετρηθεί η ενέργεια των

φωτονίων γ , η οποία αντιστοιχεί σε παλμούς με μέγιστο ύψος και στη συνέχεια με τη βοήθεια ενός αναλυτή ύψους παλμών (PHA) να αποκλειστούν παλμοί με μικρότερο ύψος οι οποίοι αντιστοιχούν σε φωτόνια μικρότερης ενέργειας τα οποία προέρχονται από σκέδαση.

Όταν φωτόνιο φθάνει στον ανιχνευτή, υποτίθεται ότι προέρχεται από ραδιενεργό άτομο το οποίο ευρίσκεται σε ευθεία γραμμή παράλληλη προς τις οπές του κατευθυντήρα. Αν εντούτοις το φωτόνιο υπέστη σκέδαση Compton πριν φθάσει στον ανιχνευτή, αυτή η υπόθεση προφανώς, δεν είναι ορθή, διότι προκαλεί την αλλαγή κατεύθυνσης του φωτονίου. Η αποδοχή αυτών των σκεδασμένων φωτονίων προκαλεί μείωση της ΔΙ της εικόνας και είναι επιθυμητό να απορρίψουμε αυτά τα φωτόνια, διότι έχουν χαμηλή Δ.Ι.σε σχέση με τα μη σκεδασμένα φωτόνια (Εικόνα 5).



Εικόνα 5: Αρχή λειτουργίας του PHA, επιλογή βέλτιστου «ενεργειακού παραθύρου» Α: 3 ενεργειακοί παλμοί περιλαμβάνονται εντός του ενεργειακού παραθύρου. Β: Επιλογή ενεργειακού παραθύρου ώστε να απορρίπτεται το πλείστον των σκεδαζόμενων παλμών.

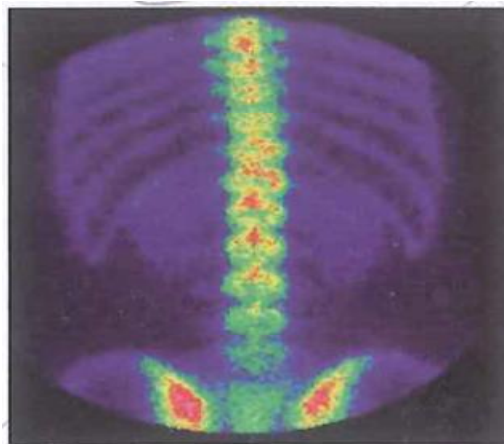
16.9. Η ΠΡΟΒΟΛΙΚΗ ΕΙΚΟΝΑ

Τα σήματα από τους μεμονωμένους PMT συνδυάζονται για να δημιουργηθούν τα σήματα X και Y θέσεως. Τα σήματα των X και Y συντεταγμένων ομαλοποιούνται ως προς το ολικό σήμα φωτεινότητας Z. Ομαλοποίηση ως προς την ενέργεια επιτρέπει ακόμη τη χρήση δύο ή τριών «παραθύρων» ενέργειας στους αναλυτές ύψους παλμών για την απεικόνιση με ισότοπο πολλαπλών ενεργειών π.χ. ^{67}Ga .

Ανατομικά χαρακτηριστικά εσωτερικών οργάνων επηρεάζουν το σχέδιο της ακτινοβολίας που προβάλλεται από το σώμα και είναι παράμετροι τις οποίες ελάχιστα μπορούμε να ελέγξουμε. Ακόμη και σ' ένα ιδανικό σύστημα, το εμβαδόν της διατομής και το πάχος του οργάνου καθορίζουν την ένταση των εκπεμπόμενων φωτονίων. Το σήμα μειώνεται με την αύξηση της απόστασης του οργάνου από τον ανιχνευτή και με το πάχος των

υπερκείμενων ιστών (εξασθένηση). Οι περιβάλλοντες ιστοί μπορεί να συνεισφέρουν μόνο σκεδαζόμενη ακτινοβολία στο σώμα, που είναι ανεπιθύμητη, διότι δε μας εφοδιάζει με πληροφορίες.

Το τελικό αποτέλεσμα είναι η προβολική εικόνα του οργάνου το οποίο έχει προσλάβει το ρφ, με πιθανές σκεδάσεις και απορρόφηση από τους υπερκείμενους ιστούς να μειώνουν την ευκρίνεια της (Εικόνα 6).



Εικόνα 6: Προβολικό σπινθηρογράφημα σπονδυλικής στήλης μετά από χορήγηση στον εξεταζόμενο $^{99m}\text{Tc-MDP}$.

16.10. ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ Γ-ΚΑΜΕΡΑ

α) *Οπτικό πεδίο.* *Χρήσιμοοπτικόπεδίο-usefulfieldofview (UFOV):* είναι η επιφάνεια του κρυστάλλου η οποία οριοθετείται από τα εσωτερικά τοιχώματα του κατευθυντήρα. Κεντρικό οπτικό πεδίο-centralfieldofview (CFOV) ορίζεται το πεδίο του οποίου η διάμετρος ισούται με το 75% της διαμέτρου του χρήσιμου οπτικού πεδίου.

β) *Ενεργειακή ΔΙ:* Περιλαμβάνεται ο καθορισμός του ενεργειακού φάσματος και ο προσδιορισμός της Ενεργειακής Διακριτικής Ικανότητας του συστήματος. Η ορθή ρύθμιση του ενεργειακού «παραθύρου» καθορίζεται επί του ενεργειακού φάσματος του του ραδιοϊσοτόπου σε χρήση. Το ενεργειακό παράθυρο περιορίζει τη λήψη των πληροφοριών (κρούσεων) μόνον από τα «χρήσιμα» ηλεκτρικά σήματα τα οποία προέρχονται από φωτόνια με ενέργεια κοντά στην των αρχικών φωτονίων που εκπέμπει το ραδιοϊσότοπο (φωτοκορυφή).

γ) *Χωρική ΔΙ:* ονομάζεται η ελάχιστη απόσταση που πρέπει να έχουν δύο σημειακές πηγές ώστε το απεικονιστικό σύστημα να είναι ικανό να τις διακρίνει ως ξεχωριστές οντότητες. Εκφράζει την ικανότητα του συστήματος να απεικονίζει στην έξοδο του μια πραγματική ραδιενεργό κατανομή. Η χωρική ΔΙ εκφράζεται μαθηματικά από την σχέση:

$$R_0 = \sqrt{R_c^2 + R_s^2 + R_l^2} \quad [16.1]$$

Όπου:

R_c =ΔΙ του κατευθυντήρα,

R_s =ΔΙ του συστήματος κρύσταλλος-ηλεκτρόνια

R_l =ΔΙ λόγω σκεδαζόμενης ακτινοβολίας.

Ποσοτικά η Χωρική ΔΙ υπολογίζεται από τη συνάρτηση γραμμικής διασποράς (Line Spread Function, LSF) η οποία εκφράζει την κατανομή των σημείων-κρούσεων επί της απεικόνισης όταν η ραδιενεργός πηγή έχει τη μορφή γραμμής. Το πλήρες εύρος στο ήμισυ του μεγίστου (Full Width Half Maximum, FWHM) της καμπύλης LSF είναι ενδεικτικό της χωρικής ΔΙ του συστήματος.

ΧΡΗΣΗ ΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΛΗ ΚΑΙ ΕΥΚΟΛΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΔΙ.

δ) *Χωρική γραμμικότητα.* Η χωρική γραμμικότητα είναι μια παράμετρος των PMT της γ-κάμερα, η οποία χαρακτηρίζει την παραμόρφωση θέσης που προκαλείται από τη γ-κάμερα σε σχέση με το σημείο του κρυστάλλου που έπεσε η ακτινοβολία.

ε) *Ευαισθησία.* Η ευαισθησία εκφράζει τον αριθμό των φωτονίων τα οποία ανιχνεύονται σε σχέση με τον αριθμό των εκπεμπόμενων φωτονίων από την πηγή. Αναφέρεται στην ικανότητα της γ-κάμερα να καταγράφει ένα κλάσμα των ακτίνων γ , οι οποίες προσπίπτουν στον ανιχνευτή, για καθορισμένο ενεργειακό παράθυρο. Ορίζεται ως ο ρυθμός μετρήσεων ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα επιφανειακής ραδιενέργειας στο πεδίο της κεφαλής της γ-κάμερα και για συγκεκριμένο ραδιοϊσότοπο. Η εσωτερική ευαισθησία αναφέρεται στην ευαισθησία του κρυστάλλου μόνον, ενώ η ευαισθησία του συστήματος εξαρτάται και από τη γεωμετρική απόδοση του κατευθυντήρα και μετράται για κάθε κατευθυντήρα ο οποίος περιλαμβάνεται στον εξοπλισμό της.

στ) *Χρονική διακριτική ικανότητα-Νεκρός χρόνος (deadtime).* Η χρονική διακριτική ικανότητα αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να καταγράφει ως ξεχωριστά δύο γεγονότα που έχουν μικρή χρονική διαφορά. Το χρονικό διάστημα, μετά από μια μέτρηση, κατά την διάρκεια του οποίου το σπινθηρογραφικό σύστημα δεν έχει την δυνατότητα να καταγράφει έναν παλμό λέγεται νεκρός χρόνος (deadtime). Εκτός από την απώλεια κρούσεων, υψηλοί ρυθμοί συχνά συσχετίζονται με απώλεια ΔΙ, λόγω της συσσώρευσης χαμηλής ενέργειας παλμών που κανονικά θα απορρίπτονταν από τον αναλυτή ύψους παλμών. Με την άθροιση τους γίνονται αποδεκτοί αλλά σε λάθος θέση στην απεικόνιση. Αν N είναι ο πραγματικός ρυθμός κρούσεων και n_0 παρατηρούμενος αριθμός κρούσεων, ενώ T_d ο νεκρός χρόνος ισχύει: $N = n_0 / (1 - n_0 T_d)$

ζ) *Ομοιομορφία και ομοιογένεια πεδίου.* Περιγράφει την δυνατότητα ενός συστήματος γ-κάμερα να απεικονίζει ακριβώς μια ραδιενεργό πηγή που έχει ομοιόμορφα κατανομηθεί σε μια επίπεδη επιφάνεια. Η εσωτερική ομοιογένεια αφορά τη γ-κάμερα χωρίς κατευθυντήρα ενώ η ομοιογένεια του συστήματος αναφέρεται στην ολική ομοιογένεια που αφορά το σύστημα μαζί με τον κατευθυντήρα.

η) *Αντίθεση και θόρυβος.* Η αντίθεση αναφέρεται στην διαφορά στην ποιότητα ή την ένταση των εικόνων περιοχών του οργάνου που περιέχουν διαφορετικές συγκεντρώσεις ραδιενέργειας. Για να απεικονιστούν οι λεπτομέρειες σε ανατομική δομή του ανθρώπινου σώματος και να εντοπιστούν βλάβες στους ιστούς, είναι απαραίτητα η καταγραφή των μεταβολών ενός μεγέθους. Έτσι ορίζεται η αντίθεση μίας περιοχής (Contrast) ως $C_0 = (A - A_0) / A_0$ όπου A, A_0 οι ενεργότητες (οι κρούσεις) στην αλλοίωση του ιστού και στον περιβάλλοντα ιστό αντίστοιχα. Όσο μεγαλύτερη είναι η αντίθεση C_0 τόσο ευκολότερη είναι η ανίχνευση της αλλοίωσης. Ο θόρυβος είναι στατικός θόρυβος ο οποίος οφείλεται σε τυχαίες διακυμάνσεις της ραδιενεργού διάσπασης ή ηλεκτρονικός θόρυβος που οφείλεται σε ατέλειες του συστήματος. Σημαντικό ρόλο στη βελτίωση της ποιότητας της εικόνας έχει ο υψηλός Λόγος σήματος προς το θόρυβο (signal-to-noise ratio, SNR)

16.11. ΑΡΧΕΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΙΑΤΡΙΚΗ

Για την ανάδυση περισσότερων πληροφοριών, οι εικόνες της γ-κάμερα αναλύονται με τη χρήση ψηφιακών συστημάτων ηλεκτρονικών υπολογιστών που δίδουν ψηφιακή εικόνα. Αυτό επιτυγχάνεται διαιρώντας ηλεκτρονικά την επιφάνεια της εικόνας σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο αριθμό μικρών, τετραγωνικών στοιχείων pixels. Η εικόνα μπορεί να διαιρεθεί σε διακεκριμένα στοιχεία ορίζοντας την επιφάνεια της σαν πίνακα 64 x 64, 128 x 128, 256 x 256 ή 512 x 512 γραμμών και στηλών. Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής ελέγχει ξεχωριστά κάθε στοιχείο (pixel) στην εικόνα. Για να επιτύχουμε την ηλεκτρονική διαίρεση της εικόνας της γ-κάμερα σε πίνακα στοιχείων, απαραίτητη είναι η μετατροπή αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά, για τη μεταφορά κάθε σήματος το οποίο καταγράφεται σε μια θέση X,Y.

Το εικονίδιο (pixel). Ένα εικονίδιο (pixel) θεωρείται γενικά ως το μικρότερο ενιαίο συστατικό μιας ψηφιακής εικόνας. Εντούτοις, ο καθορισμός είναι ιδιαίτερα εξαρτώμενος από την εφαρμογή. Παραδείγματος χάριν, υπάρχουν pixelστα οποία περιλαμβάνουν ηλεκτρονικά σήματα, ή αντιπροσωπεύουν ψηφιακές τιμές, ή τα pixelsσε μια οθόνη.

Ο όρος pixel μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μονάδα του μέτρου, και ιδιαίτερα κατά χρησιμοποίηση των pixelsως μέτρο της ΔΙ, όπως: 2400 pixelsανά ίντσα, 640 pixelsανά γραμμή, ή σε απόσταση 10 pixels. Τα μέτρα σημείων ανά ίντσα (dpi) και pixelsανά ίντσα (ppi)χρησιμοποιούνται μερικές φορές εναλλακτικά, αλλά έχουν ευδιάκριτες έννοιες. Όσον περισσότερα pixelsχρησιμοποιούνται για να αντιπροσωπεύσουν μια εικόνα, τόσο το αποτέλεσμα προσομοιάζει με την αρχική. Ανάλογα με την εφαρμογή, υπάρχουν διάφοροι όροι που είναι συνώνυμοι σε ιδιαίτερα πλαίσια, όπως ο δείκτης τιμής του pixel, το δείγμα, η ψηφιολέξη (word), το byte, το bit, dot, spot, κ.λ.π. Το μέγεθος του pixel επηρεάζει την ποιότητα της απεικόνισης. Το μέγεθος του pixeleλέγχεται επίσης από το ηλεκτρονικό σύστημα (hardware).

Μήτρα στοιχείων (matrix). Μήτρα σημείων (dot-matrix) είναι διάταξη 2 διαστάσεων και χρησιμοποιείται για να αντιπροσωπεύει χαρακτήρες, σύμβολα ή εικόνες. Η μνήμη οργανώνεται ως τετραγωνική μήτρα, η οποία αντιπροσωπεύει την περιοχή ανίχνευσης ή το οπτικό πεδίο της γ-κάμερα. Κατά αυτόν τον τρόπο, κάθε φωτόνιο το οποίο ανιχνεύεται από τον κρύσταλλο μετατρέπεται σε αριθμό και αποθηκεύεται έπειτα σε μια θέση στη μνήμη η οποία αντιστοιχεί στη θέση όπου αλληλεπίδρασε στο κρύσταλλο. Αν πολλαπλά γεγονότα ανιχνευθούν στο ίδιο σημείο του κρυστάλλου προστίθενται στην ίδια θέση της μνήμης.

Τα διάφορα «μεγέθη μήτρας» διαθέσιμα στον υπολογιστή, καθορίζουν τον αριθμό των εικόνων οι οποίες αποθηκεύονται στη γ-κάμερα. Η ευκρίνεια της μήτρας εξαρτάται από τον αριθμό και το μέγεθος των pixelστα οποία περιέχει και ορίζεται με βάση αυτά π.χ. ως 128 x 128 ή 256 x 256. Το μέγεθος της μήτρας καθορίζει και τη βέλτιστη διακριτική ικανότητα με την οποία βλέπουμε στο σύστημα απεικόνισης. Για να επιτευχθεί καλύτερη ΔΙ η μήτρα πρέπει να έχει μεγαλύτερο αριθμό-αλλά με μικρότερο μέγεθος-pixels. Π.χ. Μήτρα 128 περιλαμβάνει 16.384 pixels ενώ μεγαλύτερη μήτρα 256 x 256 αποτελείται από 65.536 pixels.

16.12. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ

Κάθε μικρός χώρος στην μήτρα μια θέση στην μνήμη η οποία ονομάζεται «byte». Για την αποθήκευση μιας εικόνας πρέπει να αποθηκευτούν οι μεμονωμένοι αριθμοί κάθε θέσης της μνήμης. Ακριβώς όπως και για την μνήμη αναφέρονται τα bytes,kbytesή Mbytesto ίδιο ισχύει και για την αποθήκευση.

Μετά τη λήψη και την ανάλυση των δεδομένων, αυτά αποθηκεύονται σε κατάλληλη μορφή, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα να επαναφορτωθούν στην μνήμη του.

Αν η λήψη της εικόνας έγινε με μήτρα 256 x 256, η εικόνα απαιτεί 65 kbytes χώρου αποθήκευσης. Αντίθετα, εικόνα με μήτρα λήψης 64 x 64, χρειάζεται μόνον 4096 bytes αποθήκευσης. Επομένως, ο αριθμός των εικόνων οι οποίες αποθηκεύονται, εξαρτάται από τον τύπο της μελέτης που έγινε και από το μέγεθος της μήτρας λήψης, π.χ. Χρησιμοποιούνται μήτρες 64 x 64 ή 128 x 128, ανάλογα με τη στατιστική κρούσεων και τις παραμέτρους λήψης και ανακατασκευής οι οποίες εφαρμόζονται. Ο αριθμός pixel σε μήτρα 128 x 128 είναι εκθετικά μεγαλύτερος απ' ό τι σε μήτρα 64 x 64 (128² pixel προς 64² pixel). Ο διπλασιασμός του μεγέθους της μήτρας για το ίδιο οπτικό πεδίο (FoV) μειώνει το μέγεθος pixel κατά παράγοντα 2. Περισσότερες κρούσεις απαιτούνται για τη διατήρηση της ποιότητας εικόνας όταν χρησιμοποιείται μεγαλύτερη μήτρα, για την αποφυγή αύξησης του θορύβου, καθώς τα δεδομένα κατανέμονται σε μεγαλύτερο αριθμό pixel της εικόνας.

Το μέγεθος pixel σχετίζεται άμεσα με τη μεγέθυνση της μήτρας λήψης. Αν πρόκειται να γίνει μεγέθυνση για βελτίωση της εικόνας, είναι προτιμότερο η μεγέθυνση να εφαρμοσθεί κατά το χρόνο λήψης (hard ware zoom). Μεγέθυνση μέσω λογισμικού (επεξεργασία του pixel μετά τη λήψη της εικόνας βελτιώνει μερικώς την απεικόνιση αλλά δεν ανακτά τη ΔΙ στον ίδιο βαθμό). Σε λήψεις με μικρές χορηγούμενες ενεργότητες, αυξάνεται ο θόρυβος ο οποίος αναιρεί τα πλεονεκτήματα της ΔΙ τα οποία θα παρείχαν οι πιθανόν μικρές διαστάσεις του pixel.

16.13. ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ (SOFTWARE)

Κατά την απεικόνιση τα δεδομένα μετατρέπονται σε «σκιές γκρίζου» και ο ηλεκτρονικός υπολογιστής χρησιμοποιεί διάφορους τύπους αποθήκευσης, όπως ο σκληρός δίσκος. Αυτά τα μέρη αποτελούν μέρος του «hardware» του συστήματος (εγκατάστασης) της γ-κάμερα.

Εντούτοις, χωρίς το λογισμικό ο ηλεκτρονικός υπολογιστής θα ήταν τελείως άχρηστος. Το λογισμικό κάνει τον υπολογιστή λειτουργικό, επιτρέπει να εκτελεί μαθηματικές εργασίες, να παίρνει αποφάσεις, να απεικονίζει πληροφορίες. Στην Πυρηνική Ιατρική το λογισμικό είναι υπεύθυνο για τη μετατροπή ενός σήματος σε αριθμό, σε ποιο σημείο της μνήμης θα καταγραφεί κάθε γεγονός, για την απεικόνιση σε «διαβαθμίσεις του γκρίζου», κ.ά.. Το λογισμικό αποτελείται από εξειδικευμένες οδηγίες οι οποίες συνιστούν ένα ή περισσότερα προγράμματα τα οποία θα δώσουν αποτελέσματα χρήσιμα στον ιατρό για την αναγνώριση διαγνωστικών πληροφοριών.

Οι κλινικές μελέτες μπορεί να επηρεασθούν από την ευελιξία του λογισμικού για λήψη δεδομένων, την επεξεργασία αλλά και την αξιολόγηση των εικόνων. Με ένα καλά δομημένο λογισμικό και ένα σχετικά απλό hardware μπορεί να εκτελεσθούν σύνθετες λήψεις ή επεξεργασίες ιατρικών δεδομένων.

16.14. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΩΝ-ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ

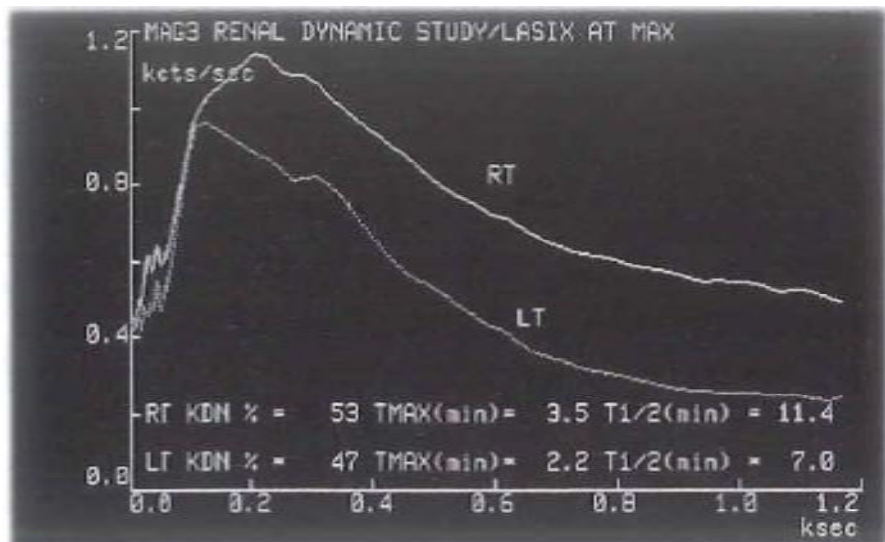
Η εκτίμηση της λειτουργίας ενός οργάνου επιτυγχάνεται καλύτερα μέσω της σύγκρισης και αξιολόγησης της σειράς των εικόνων σε συνάρτηση με τον χρόνο. Οι λειτουργικές (δυναμικές) μελέτες καταγράφουν τη διεργασία του ρφ στο υπό μελέτη όργανο. Τα περισσότερα ψηφιακά συστήματα είναι ικανά να καταγράφουν 10-20 εικόνες το δευτερόλεπτο και επιτυγχάνονται δυναμικές μελέτες λειτουργίας οργάνων, όπως η κύστη κατά την άμεση κυστεογραφία ή οι νεφροί στη μελέτη της λειτουργίας αυτών.

Είναι δυνατό σε περιοχές ενδιαφέροντος (ROI) των προβολικών εικόνων να καταγράφονται οι κρούσεις, ρυθμός κρούσεων ή ο αριθμός των στοιχείων (pixels) της περιοχής ενδιαφέροντος σε σύγκριση με άλλη αντίστοιχη περιοχή. Απόλυτα ποσοτικές μετρήσεις στη συγκέντρωση ραδιενέργειας είναι δύσκολο να πραγματοποιηθούν. Αντίθετα σχετικές μετρήσεις της ραδιενέργειας ίνινο γίνονται εφόσον οι συνθήκες παραμένουν οι ίδιες για όλες τις μετρήσεις, οι οποίες θα συγκριθούν. Απλό παράδειγμα αποτελεί ο προσδιορισμός της συμμετοχής στην νεφρική λειτουργία, αριστερού και δεξιού νεφρού ως σχετικό ποσοστό.

16.15. ΤΜΗΜΑ ΙΝΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ-ΟΡΓΑΝΟΛΟΓΙΑ

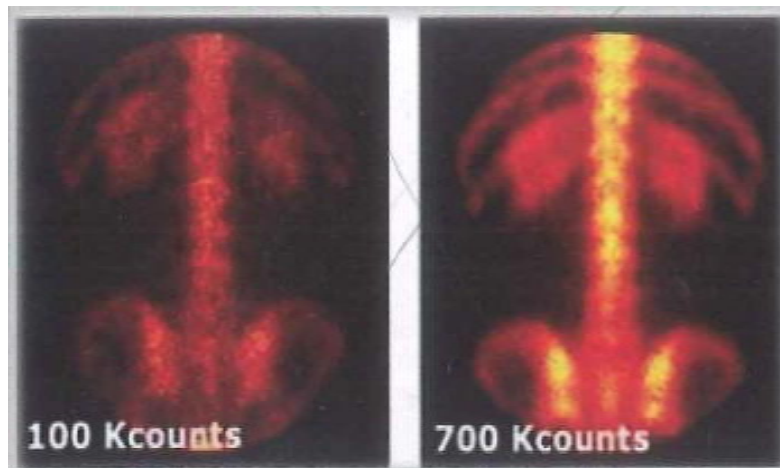
Για τη λήψη καλύτερης εικόνας πρέπει να επιλεγεί ο κατάλληλος κατευθυντήρας και τα κριτήρια ολοκλήρωσης της εξέτασης. Να ελαχιστοποιηθούν τα φαινόμενα σκέδασης με την ορθή τοποθέτηση της «κεφαλής» της γ-κάμερα και να τηρούνται οι χρόνοι λήψης των εικόνων μετά τη χορήγηση του ρφ.

Σημασία έχουν επίσης οι αντιμαχόμενες επιδράσεις μεταξύ ευαισθησίας και ΔΙ. Βελτίωση μιας εκ των παραμέτρων ποιότητας, συχνά γίνεται σε βάρος μιας άλλης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η σχέση ευαισθησίας και χωρικής ΔΙ. Αύξηση της ΔΙ επιφέρει μείωση της ευαισθησίας του συστήματος και το αντίθετο. Η επίδραση του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Πρέπει να επιλεγεί η κατάλληλη μήτρα και ο ενδεδειγμένος χάρτης διόρθωσης της γ-καμπύλης και να εφαρμοσθούν τα πλεονεκτήματα της σύγχρονης τεχνολογίας.



Εικόνα 7: Καμπύλες λειτουργίας των 2 νεφρών, υπολογισμός ποσοστών συμμετοχής, μεγίστου χρόνου διήθησης και χρόνου ημισείας απέκκρισης εκάστου.

Οι οδηγίες της Αμερικάνικης Εταιρείας Πυρηνικής Καρδιολογίας (ASNC) π.χ. συνιστούν ως παραμέτρους λήψης της εικόνας, μήτρα 64 x 64 και μέγεθος pixel 6.4mm. Η ποιότητα της εικόνας, με χρήση επαναληπτικών (iterative) τεχνικών και τη βελτίωση της ΔΙ ή/και τη διόρθωση εξασθένησης βελτιώνεται όταν η λήψη της εικόνας γίνεται με ευκρινέστερη μήτρα (π.χ. 128 x 128) και μικρότερο μέγεθος pixel 4.8mm.



Εικόνα 8: Η επιλογή των ορθών κριτηρίων λήξης με βάση το σύνολο των κρούσεων ή και το χρόνο, ή και τα δύο – είναι κρίσιμη για τη βελτίωση της ποιότητας της εικόνας.

Η επιλογή της ορθής μήτρας (matrix). Πρέπει να εξασφαλισθεί ότι η επιλογή μήτρας είναι συμβατή με την απαιτούμενη ΔΙ. Το μέγεθος του pixel πρέπει να είναι μικρότερο από το μικρότερο χαρακτηριστικό της εικόνας το οποίο είναι υπό μελέτη. Για παράδειγμα δεν αναμένεται να απεικονισθεί ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα 8mm με pixels μεγαλύτερα από 8mm. Μέγεθος μήτρας μεγαλύτερο δεν είναι πάντα η καλύτερη επιλογή. Σε κακής στατιστικής δεδομένα τα οποία λαμβάνονται με μεγάλη μήτρα διαπιστώνεται ότι τα μικρότερα pixels περιέχουν λιγότερες πληροφορίες. Αυτό οδηγεί σε εικόνες με εμφάνιση θορύβου. Η επιλογή του μεγέθους της μήτρας γίνεται με βάση τις απαιτήσεις της Δ.Ι. για το υπό απεικόνιση αντικείμενο και την εξισορρόπηση με τη στατιστική των δεδομένων λήψης. Οι δυνατότητες επεξεργασίας του συστήματος ηλεκτρονικού υπολογιστή συχνά βελτιώνουν την ποιότητα εικόνας σημαντικά. Επομένως έχει ιδιαίτερη σημασία η επίγνωση των δυνατοτήτων της επιλογής των παραμέτρων λήψης και του χειρισμού των δεδομένων μετά την εξέταση.

Κατάλληλα κριτήρια τερματισμού λήψης της εικόνας. Χρήση ανεπαρκών κριτηρίων λήξης των λήψεων οδηγεί σε σχετικά κακή ποιότητα εικόνας. Τα αποτελέσματα είναι προφανή: Εάν δε δοθεί στο σύστημα, αρκετός χρόνος ώστε να συλλέγουν επαρκή δεδομένα, η ποιότητα των εικόνων θα είναι κακή.

16.16. ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗ ΚΑΙ ΣΚΕΔΑΣΗ

Η μείωση των κρούσεων εξαρτάται από το γραμμικό συντελεστή εξασθένησης μ του υλικού (ιστός) και από την απόσταση χ του εξεταζόμενου-πηγή από τον κρύσταλλο-ανιχνευτή κατά την εξίσωση: $I=I_0 \exp(-\mu\chi)$ όπου I_0 είναι η ένταση της αρχικής δέσμης φωτονίων και I η ένταση μετά την εξασθένηση. Η σκέδαση προσθέτει οπισθοσκεδαζόμενες κρούσεις οι οποίες εκλαμβάνονται ψευδώς ως πληροφορίες. Η ένταση της δέσμης τότε καθορίζεται από την σχέση $I=B(\mu\chi) I_0 \exp(-\mu\chi)$ όπου $B(\mu\chi)$ είναι ο παράγων οπισθοσκέδασης (buildupfactor).

Η σκέδαση οφείλεται α) πρώτιστα στο μέγεθος του εξεταζόμενου. Αλλά η μείωση της επίδρασης της σκέδασης μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ασύμμετρου ενεργειακού «παραθύρου» βελτιώνοντας την ποιότητα της καταγεγραμμένης ακτινοβολίας. β) Για τους κατευθυντήρες παραλλήλων οπών, όσο πλησιέστερα στον εξεταζόμενο ευρίσκεται η

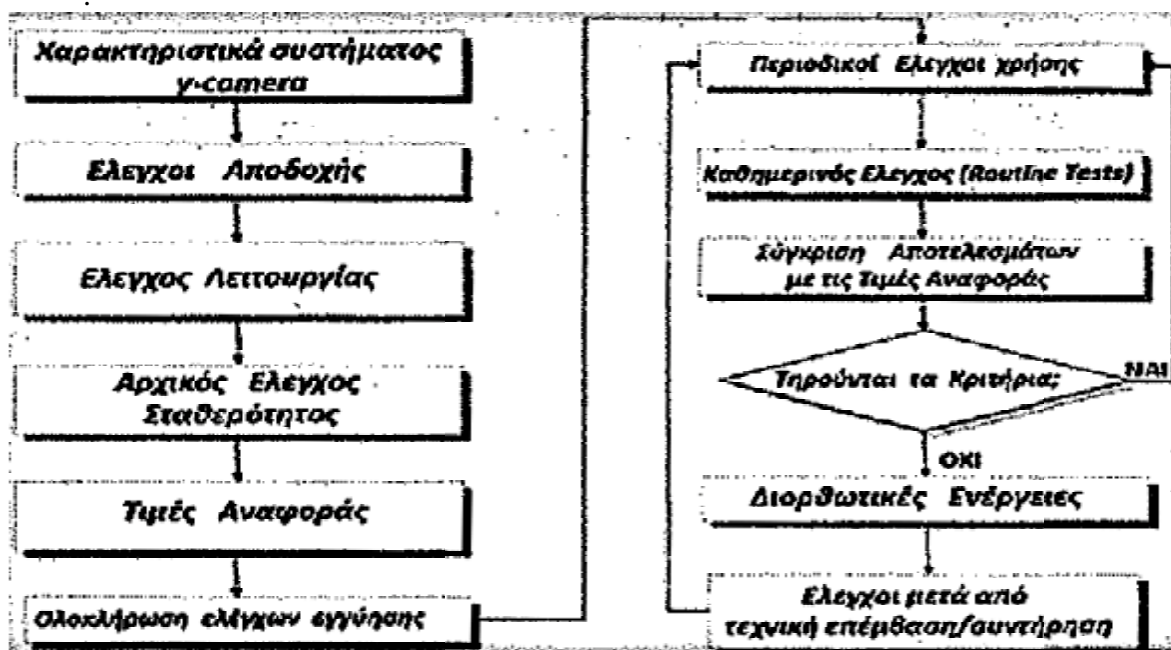
«κεφαλή» της γ-κάμερα, τόσο καλύτερα είναι τα αποτελέσματα. γ) Η μέθοδος τριπλό ενεργειακό παράθυρο, TEW, εφαρμόζεται πολλές φορές για την αφαίρεση, από την προβολική εικόνα, των κρούσεων οι οποίες καταγράφονται από σκεδάσεις, επιτυγχάνοντας ποιοτική και ποσοτική βελτίωση της εικόνας. Ο λόγος των ολικών κρούσεων στο εύρος του παραθύρου της φωτοκορυφής προς τις κρούσεις από σκεδάσεις υπολογίζεται για την ποσοτικοποίηση των κρούσεων από σκεδάσεις Comptom εντός της φωτοκορυφής και την αφαίρεση αυτών. Αφαιρείται και το υπόστρωμα. Μετά την αφαίρεση των κρούσεων εκ σκεδάσεως από το παράθυρο της φωτοκορυφής υπάρχει σημαντική βελτίωση της σπινθηρογραφικής εικόνας.

16.17. ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ Γ-ΚΑΜΕΡΑΣ

Ποιοτικός Έλεγχος στο σύστημα της γ-κάμερας γίνεται κατά την εγκατάσταση του συστήματος, και είναι μετρήσεις Αποδοχής για να επιβεβαιωθεί ότι η λειτουργία του συστήματος καλύπτει τα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά τα οποία δηλώνει ο κατασκευαστής.

Ποιοτικός Έλεγχος Αναφοράς γίνεται σε περιοδικούς ετήσιους ελέγχους ή ακόμη σε περιπτώσεις σημαντικής βλάβης μέρους του συστήματος και αποκατάστασης αυτής, για να δημιουργηθούν νέα δεδομένα αναφοράς.

Καθημερινός Ποιοτικός Έλεγχος (Routine Quality Control) σε παραμέτρους του συστήματος οι οποίες είναι πιθανόν να αλλάζουν συχνά και ελέγχονται με απλό τρόπο. Κάποιες από αυτές είναι: Επισκόπηση (π.χ. φθορά ή μόλυνση του κατευθυντήρα), μετρήσεις υποστρώματος χώρου, έλεγχος με επίπεδη πηγή χαμηλής στατιστικής, έλεγχος φωτοκορυφής/καθορισμός ενεργειακού παραθύρου.



Σχήμα 20: Περιγραφή των διεργασιών οι οποίες ακολουθούνται κατά τους ποιοτικούς ελέγχους αποδοχής και τους περιοδικούς ελέγχους του συστήματος της γ – κάμερας

Αιτίες, οι οποίες είναι πιθανόν να υποβαθμίσουν τη λειτουργία της γ-κάμερα μπορεί να είναι: βλάβη του κατευθυντήρα, βλάβη ή απόκλιση της τάσης του PMT, μετατόπιση της ενεργειακής κορυφής, απορρύθμιση ηλεκτρονικών, ηλεκτρονικός θόρυβος, φθορά κρυστάλλου ή υλικού φωτοζεύξης, ραδιομόλυνση συστήματος ή χώρου π.χ. ζημιά του κατευθυντήρα από πιθανό κτύπημα δεν είναι πάντα ορατή με απλή επισκόπηση. Σε υπόνοια βλάβης θα πρέπει να γίνει σπινθηρογράφημα με επίπεδη πηγή.

Ουσιαστική συνεισφορά στη βελτίωση της απεικόνισης είναι η εκπαίδευση του προσωπικού στην καλή λειτουργία και την ποιότητα του αποτελέσματος ώστε να επιβεβαιωθεί ότι τα δεδομένα-πληροφορίες λαμβάνονται ορθά. Αν ο χρήστης δεν συλλέγει τα κλινικά δεδομένα με τρόπο που θα επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση της ΔΙ (π.χ. μείωση της ΔΙ με την απόσταση της κεφαλής του συστήματος από τον εξεταζόμενο), η βελτίωση της ΔΙ της γ-κάμερα δεν θα έχει το αναμενόμενο αποτέλεσμα στην εικόνα.

17. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ

17.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τομογραφία αναφέρεται στην απεικόνιση σε τομές ενός αντικειμένου, με την χρήση ενός είδους διεισδυτικού κύματος. Η μέθοδος χρησιμοποιείται στην ιατρική (Ακτινοβολία, Πυρηνική Ιατρική κ.ά) την αρχαιολογία, τη βιολογία, γεωφυσική, ωκεανογραφία, αστροφυσική και σε άλλες επιστήμες.

Ο όρος τρισδιάστατη απεικόνιση (3D) αναφέρεται όλο και συχνότερα στις εφαρμογές αυτών των μεθόδων και σε πολλές περιπτώσεις οι πληροφορίες οι οποίες εξάγονται από 3D απεικονίσεις είναι πλέον χρήσιμες ή και συμπληρωματικές των απεικονίσεων σε τομές (2D).

Οι τεχνολογίες μοριακής απεικόνισης βελτιώθηκαν τις 2 προηγούμενες δεκαετίες, παρέχοντας μη επεμβατική και ποσοτική απεικόνιση των βιολογικών και βιοχημικών διαδικασιών *in vivo*.

17.2. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΜΩΝ

Η δημιουργία των τομών βασίζεται σε μαθηματική διαδικασία, της ανακατασκευής. Οι σύγχρονες εφαρμογές τομογραφίας περιλαμβάνουν τη συλλογή προβολικών δεδομένων από πολλαπλές γωνίες και αυτά οδηγούνται σε μαθηματικούς αλγορίθμους ανακατασκευής σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Σε διαφορετικούς τρόπους λήψης του σήματος χρησιμοποιούνται παρόμοιοι υπολογιστικοί αλγόριθμοι για τη δημιουργία τομογραφικής εικόνας

Εικονίδια όγκου (voxels). Ένα voxel (ογκομετρικό εικονίδιο ή εικονίδιο όγκου) είναι το μικρότερο στοιχείο όγκου, το οποίο αντιπροσωπεύει μια τιμή σε κανονικό πλέγμα σε χώρο 3 διαστάσεων (3D). Το voxel αντιπροσωπεύει ένα κύβο υπόγκου με σταθερή τιμή διανύσματος. Αυτό είναι ανάλογο με ένα pixel, το οποίο αντιπροσωπεύει 2-διαστάσεων (2D) δεδομένα εικόνας σε ένα δυαδικό αρχείο εικόνας, τα voxels δεν καθορίζουν τη θέση τους (τις συντεταγμένες τους) ρητά με τις τιμές τους. Οι τιμές των voxels χρησιμοποιούνται στην απεικόνιση και την ανάλυση ιατρικών και επιστημονικών στοιχείων. Η τιμή ενός voxel εκφράζει διάφορες ιδιότητες που εξαρτώνται από το είδος της εξέτασης που το δημιούργησε π.χ. NM, CT, MRI. Διαγνωστικά δεδομένα μετατρέπονται σε μορφοποίηση μεγάλου αριθμού voxels, ανά-κατασκευάζοντας το ανθρώπινο σώμα σε τρισδιάστατη ψηφιακή μορφή.

Σήμερα υπάρχουν 38 ανθρώπινα voxel ομοιώματα και συνεχώς δημιουργούνται νέα για τη βελτίωση ύψους και βάρους στις παραλλαγές των πληθυσμών. Οι πλέον πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα είναι τα boundary representation (BREP) ομοιώματα. Αυτά είναι υπολογιστικά πρότυπα που περιέχουν εξωτερικά και εσωτερικά χαρακτηριστικά του ανθρώπινου σώματος.

17.3. ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ-ΗΜΙΤΟΝΟΓΡΑΜΜΑ

Υπολογιστική τομογραφία είναι η διαδικασία της ανακατασκευής αντικειμένου δύο διαστάσεων από προβολές μίας διάστασης από διάφορες γωνίες (δηλ. το γραμμικό ολοκλήρωμα της πυκνότητας οριζοντίων και κατακόρυφων παραλλήλων γραμμών).

Το Ημιτονόγραμμα είναι τρόπος απεικόνισης των δεδομένων που προκύπτουν από την εφαρμογή μετασχηματισμού επί της συνάρτησης των προβολών. Το όνομα του ημιτονογράμματος οφείλεται στο ότι αν απεικονίσουμε τη συνάρτηση προβολών μιας εικόνας που αποτελείται από μόνο ένα σημείο, θα πάρουμε τη γραφική παράσταση μιας ημιτονοειδούς συνάρτησης.

17.4. ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΜΟΝΗΡΟΥΣ ΦΩΤΟΝΙΟΥ- SINGE PHOTON EMISSION TOMOGRAPHY-(SPET)

Η ακριβής ποσοτική ανάλυση στη συγκέντρωση της ραδιενέργειας αποτελεί έναν από τους στόχους της SPET μετά την διόρθωση παραμέτρων αρνητικών στην απεικόνιση.

Ολοκληρωμένη τεχνολογία φέρει τους ανιχνευτές πλησιέστερα στον εξεταζόμενο για καλύτερη Δ.Ι. εικόνας, κάνοντας λήψη πληροφοριών με ακρίβεια και απόδοση. Η ανακατασκευή γίνεται γρήγορα χωρίς αύξηση του θορύβου. Με την πολύ λεπτή τράπεζα, την οποία φέρει, μειώνεται η εξασθένηση και βελτιώνεται η ποιότητα της εικόνας.

Λήψεις για τη δημιουργία εικόνων SPET. Η SPET παρέχει εικόνες μεμονωμένων διατομών του οργάνου χωρίς παρεμβολή υπερκειμένων ή υποκειμένων ιστών. Η τεχνική ανακατασκευής, στηρίζεται στις αρχές της αξονικής τομογραφίας με ακτίνες -X, αλλά μετράται η ακτινοβολία η οποία εκπέμπεται από το όργανο-πηγή. Αντίθετα, στην αξονική τομογραφία (CT) μελετάται, η ακτινοβολία η οποία εκπέμπεται από εξωτερική πηγή (λυχνία) αφού πρώτα διέλθει από το σώμα ασθενούς και μετρούνται οι διαφορετικές πυκνότητες των οργάνων.

Ένα πλήρες τομογραφικό σύστημα εκπομπής (SPET) αποτελείται από μια ή περισσότερες κεφαλές γ-κάμερα αναρτημένες σε βραχίονες, με ηλεκτρονική κίνηση. Οι βραχίονες συνδέονται στην εσωτερική πλευρά από ένα δακτύλιο μέσω του οποίου επιτυγχάνεται πλήρης περιστροφή 360 ή άλλον τομέα περιστροφής (π.χ. 45, 90, 120). Η εξεταστική τράπεζα μετατοπίζεται ευθύγραμμα σε ειδικές ράγες στο δάπεδο και έχει κατάλληλες διαστάσεις ώστε να είναι δυνατή ή όσο το δυνατό καλύτερη προσέγγιση της ανιχνευτικής κεφαλής στο σώμα του ασθενούς. Είναι κατασκευασμένη από ανθρακικές ίνες για να ελαχιστοποιείται η εξασθένηση της διερχόμενης γ-ακτινοβολίας κάτωθεν αυτής. Τέλος υπάρχει το υπολογιστικό σύστημα για την καταχώρηση πληροφοριών και την, εν συνεχεία, επεξεργασία αυτών.

Για να ολοκληρωθεί τομογραφία εκπομπής γ-ακτινών, με την περιστροφή της SPET γ-κάμερα, περίξ τμήματος του σώματος του εξεταζόμενου λαμβάνονται δεδομένα από το όργανο-πηγή από πολλές θέσεις στο χώρο δηλαδή καταγράφονται οι όψεις του οργάνου από διάφορες γωνίες. Στη πράξη, τέτοιες όψεις είναι οι κλασσικές προβολικές εικόνες με γ-κάμερα. Η επεξεργασία του συνόλου των δεδομένων δίδει τη δυνατότητα δημιουργίας μιας ή περισσότερων τομών του οργάνου.

17.5. ΈΛΕΓΧΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΚΗΣ Γ-ΚΑΜΕΡΑ (SPET)

Βασικό πρόβλημα στην τομογραφία με SPET είναι ότι το εύρος της καταγραφής του ρυθμού κρούσεων πρέπει να είναι ανάλογο με τη ραδιενέργεια που περιέχεται σε μια στενή καλά καθορισμένη «διαδρομή ακτίνων». Αλλά η καμπύλη απόκρισης ενός κατευθυντήρα αλλάζει με την απόσταση του οργάνου-πηγή από τον κατευθυντήρα και ο ρυθμός κρούσεων δεν εξαρτάται μόνο από την ραδιενέργεια αλλά και από το βάθος του οργάνου μέσα στο σώμα αφού η ακτινοβολία εξασθενεί ανά μονάδα πάχους ιστού. Έλεγχοι κατά την παραλαβή, περιοδικοί και καθημερινοί είναι απαραίτητοι για την πιστοποίηση της καλής λειτουργίας της SPET γ-κάμερα. Παράμετροι όπως η ομοιογένεια, η ευαισθησία, η ενεργειακή ΔΙ, ο ρυθμός κρούσεων, η χωρική ΔΙ αποτελούν προϋποθέσεις για τη δημιουργία διαγνωστικών εικόνων υψηλής ποιότητας.

Γίνεται, επίσης, έλεγχος της ταύτισης του ηλεκτρονικού και μηχανικού κέντρου περιστροφής (center of rotation, COR).

Κατά την περιστροφή της SPET, η θέση της προβολής του κέντρου της περιστροφής (COR) στη μήτρα κάθε εικόνας προβολής-πρέπει να είναι σταθερή. Εάν το μηχανικό και ηλεκτρονικό κέντρο περιστροφής ευθυγραμμίζονται, η θέση του pixel της προβολής του κέντρου περιστροφής επί της μήτρας της εικόνας θα είναι η ίδια για όλες τις εικόνες προβολής. Εάν, εντούτοις, το μηχανικό και ηλεκτρονικό κέντρο περιστροφής δεν ευθυγραμμίζονται, η θέση του pixel του COR θα ποικίλει για τις εικόνες προβολών και οι κρούσεις σε κάθε pixel από την εικόνα προβολής θα συλλέγονται σε διαφορετικές θέσεις στην τομογραφική μήτρα εικόνας. Στα σημερινά συστήματα SPET, η μη ευθυγράμμιση του COR μπορεί εύκολα να μετρηθεί και να αποθηκευθούν διορθώσεις οι οποίες θα χρησιμοποιούνται αυτόματα από το λογισμικό του συστήματος της SPET.

Στις τομογραφικές γ-κάμερα με περισσότερες της μίας κεφαλής λαμβάνεται μέριμνα για την ευθυγράμμιση αυτών αλλά και για το ρυθμό κρούσεων κατά την ανίχνευση.

Ανακατασκευή των εικόνων SPET. Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής αναλύει τα προβολικά δεδομένα και ανακατασκευάζει μια εικόνα από την κατανομή ραδιενέργειας μέσα στην τομή. Οι εικόνες που εξάγονται από την τομογραφία δείχνουν την κατανομή των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας σε μία λεπτή τομή του οργάνου. Βάση της μεθόδου ανακατασκευής στη SPET αποτελεί η θεωρία της οπισθοπροβολής (back projection, BP).

Εάν οπισθοπροβάλλουμε (back project) όλες τις προβολές οριζόντιες και κατακόρυφες στο επίπεδο x, y ώστε η κατανομή της οπισθοπροβαλλομένης ενεργότητας να είναι ανάλογη αυτής των προβολών, τότε παίρνουμε την κατανομή του σχήματος.

Είναι σαφές ότι το αρχικό αντικείμενο έχει αρχίσει να εμφανίζεται, αλλά επίσης δραστηριότητα η οποία δεν υπήρχε στο αρχικό αντικείμενο φαίνεται να υπάρχει στο επίπεδο x, y . Υπό ορισμένες προϋποθέσεις αυτή η μη αναμενόμενη δραστηριότητα γύρω από την εικόνα («θόρυβος» ή «υπόστρωμα») μπορεί να εξαλειφθεί. Για να εξαλειφθεί ο θόρυβος πρέπει να έχουμε πολλές προβολές σε όλες τις δυνατές γωνίες και να φιλτράρουμε κατάλληλα τις προβολές ούτως ώστε όταν κατά την οπισθοπροβολής τα αποτελέσματα τους προστίθενται, να αλληλοαναιρούνται σε περιοχές έξω από το αρχικό αντικείμενο. Το τελικό αποτέλεσμα θα είναι επομένως επαλληλία οπισθοπροβολών των φιλτραρισμένων προβολών που έχουν τώρα θετικές και αρνητικές τιμές ώστε ο θόρυβος να αλληλοαναιρείται «ακριβώς». Η αναπαράσταση της εικόνας μπορεί να γίνει σε 2 διαστάσεις (x, y) ή σε 3 διαστάσεις (x, y, z). Στις 2-διάστατες τομές η 3^η διάσταση αντικαθίσταται με κλίμακα χρωμάτων (colorscale) ή κλίμακα του γκριζου (grayscale).

Εξασθένηση-Εξισορρόπηση σκέδασης. Βασικό προτέρημα της τομογραφίας με γ-κάμερα είναι ότι οι εικόνες της «περιέχονται» στο χώρο δηλαδή έχουν την ιδιότητα και των τριών διαστάσεων. Με αποτελεσματική αφαίρεση δεδομένων από περιοχές γύρω από το αντικείμενο ενδιαφέροντος, βελτιώνεται η αντίθεση στην εικόνα. Εντούτοις, παρά τις

σημαντικές βελτιώσεις των συστημάτων, για τη σωστή ερμηνεία εικόνων και εξετάσεων πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν οι τεχνικοί περιορισμοί της μεθόδου.

Η εξασθένηση της ακτινοβολίας, καθώς περνά από υπερκείμενους ιστούς μέχρι την επιφάνεια του εξεταζόμενου, είναι ένας αναπόφευκτος περιορισμός στην απεικόνιση με ραδιονουκλίδια. Περιορίζει, έτσι, η εξασθένηση τη δυνατότητα της τομογραφικής απεικόνισης για ποσοτικές μετρήσεις, αφού ο αριθμός των κρούσεων στην περιοχή ενδιαφέροντος δεν εξαρτάται μόνο από την ενεργότητα της περιοχής αυτής αλλά και από το βάθος της και τη σύσταση της καθώς και από τους συντελεστές εξασθένησης των ιστών οι οποίοι την περιβάλλουν.

Είναι σημαντικό να γίνεται διάκριση μεταξύ των όρων απορρόφηση και εξασθένηση. Η εξασθένηση περιλαμβάνει και το φαινόμενο της σκέδασης Compton. Ποσοτική μέτρηση της απορρόφησης μπορεί να περιγράψει μονοσήμαντα για συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίου και συγκεκριμένο υλικό, ενώ η εξασθένηση απαιτεί καθορισμό της ακριβούς γεωμετρίας για μια μέτρηση.

Η σκέδαση φωτονίων συνεισφέρει στη μείωση της ΔΙ και της Αντίθεσης και οδηγεί σε σφάλματα ποσοτικών μετρήσεων στην τομογραφία. Η σκέδαση μπορεί να προκληθεί από διάφορους μηχανισμούς αλλά τυπικά, μόνον η αλληλεπίδραση Compton είναι σημαντική στην εικόνα SPET. Το ποσοστό συμμετοχής της σκέδασης στην φωτοκορυφή (και επομένως και στην εικόνα) αυξάνει για φωτόνια χαμηλής ενέργειας. Π.χ. στη συσχέτιση Θαλλίου (^{201}Tl) και τεχνητίου ($^{99\text{m}}\text{Tc}$), η απεικόνιση καρδιάς με τεχνητίο υπερτερεί, αφού στη φωτοκορυφή του ^{201}Tl περιέχεται υπερδιπλάσιο ποσοστό σκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Αυξάνει επίσης, η σκέδαση με το βάθος της πηγής και εικόνας από πηγές βαθύτερα στο σώμα εξασθενούν περισσότερο απ' ό,τι επιφανειακές πηγές. Η διόρθωση λόγω σκέδασης είναι ένα ουσιαστικό βήμα προς τη διόρθωση της εξασθένησης.

17.6. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΛΙΝΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΣΤΗΝ SPET

Οι τεχνικές της National Electrical Manufacturers Association (NEMA) χρησιμοποιούνται γενικά για τον έλεγχο αποδοχής των συστημάτων SPET. Οι πληροφορίες οι οποίες παρέχονται από αυτές τις τεχνικές περιορίζονται στην καλή λειτουργία των ανιχνευτών, και δεν είναι εύκολο να προβλεφθεί η απόδοση του συστήματος σε συνδυασμό με το λογισμικό μιας κλινικής εφαρμογής. Δεν υπάρχει κανένα τυποποιημένο πρωτόκολλο για τον ποιοτικό έλεγχο του λογισμικού των κλινικών διαδικασιών SPET εξαρτώνται ιδιαίτερα από τις παραμέτρους λήψης και επεξεργασίας, οι οποίες επιλέγονται σύμφωνα με τον κλινικό στόχο.

Αυτές οι παράμετροι συνήθως ενσωματώνονται σε πρωτόκολλα προκειμένου να επιτρέψουν την τυποποίηση της μελέτης. Τα πακέτα λογισμικού δεν είναι πάντα τα βέλτιστα για ιδιαίτερες κλινικές μελέτες. Μετά την τυποποίηση των πρωτοκόλλων κλινικών και ποιοτικού ελέγχου οι διαδικασίες αυτών τηρούνται πιστά για την εξαγωγή στατιστικών αποτελεσμάτων και αξιολόγηση.

18. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΠΟΖΙΤΡΟΝΙΩΝ (PET)

18.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μια άλλη προσέγγιση της τομογραφίας είναι η τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων-positron emission tomography (PET). Απαιτεί διαφορετική τεχνική συλλογής δεδομένων για τη δημιουργία εικόνων με χρήση μιας ομάδας ρφ άλλων από εκείνα τα οποία χρησιμοποιούνται στη SPET τομογραφία και εκπέμπουν γ-ακτινοβολία. Αυτά είναι ενώσεις επισημασμένες με ραδιενεργά άτομα τα οποία διασπώνται με εκπομπή ενός ποζιτρονίου (e^+). Στη διαδικασία διάσπασης, ένα θετικά φορτισμένο ηλεκτρόνιο δηλ. ένα ποζιτρόνιο, εκπέμπεται από το άτομο. Ταξιδεύει μια πολύ μικρή διαδρομή μέσα στον ιστό πριν χάσει την κινητική του ενέργεια και έλθει σε ηρεμία. Αμέσως μετά ενώνεται με ηλεκτρόνιο (e^-), αρνητικά φορτισμένο σωματίο, και η μάζα και των δύο σωματιδίων μετατρέπεται, σε ενέργεια, ως δύο φωτόνια ενέργειας 511 keV έκαστο και με αντίθετες κατευθύνσεις διαδρομής (φαινόμενο εξάυλωσης). Η ανίχνευση αυτών των φωτονίων αποτελεί την αρχή της PET.

Η PET βασίζεται σε ρφ επισημασμένα με ραδιενεργά ισότοπα που εκπέμπουν ποζιτρόνια, όπως είναι τα F-18, C-11, N-13, O-15, Rb-82. Τα ποζιτρόνια που εκπέμπονται, αφού διανύσουν μια μέση εμβέλεια που σε μαλακό ιστό κυμαίνεται από 2,15 mm ως 15,50mm ανάλογα με το ισότοπο, εξαυλώνονται από κοινού με ένα ηλεκτρόνιο, με ταυτόχρονη εκπομπή σε αντιδραμετρικής κατευθύνσεις δύο φωτονίων ενέργειας 511 keV. Εκμεταλλευόμεστε την αστάθεια πυρήνων πλούσιων σε πρωτόνια οι οποίοι διασπώμενοι εκπέμπουν ένα ποζιτρόνιο και ένα νετρόνιο, $p \rightarrow n + \beta^+ + \nu$.

18.2. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΠΟΖΙΤΡΟΝΙΩΝ-ΚΥΚΛΟΤΡΟΝΙΟ

Περίπου το 50% των δέκα χιλιάδων επιταχυντών σωματιδίων που λειτουργούν σήμερα χρησιμοποιούνται για εφαρμογές της Ιατρικής και της Βιολογίας. Περιορισμός στην ευρεία εξάπλωση της μεθόδου PET διεθνώς, αποτέλεσε ο μικρός χρόνος ημίσειας ζωής των χρησιμοποιούμενων ραδιοισοτόπων με μέγιστο αυτό του ^{18}F (109,7 min). Αυτή η συνθήκη καθιστά απαραίτητη την παραγωγή τους σε μικρή απόσταση από το χώρο εφαρμογής της PET.

Ο επιταχυντής για την παραγωγή βραχύβιων ραδιονουκλιδίων είναι το κυκλοτρόνιο, όχι με την αρχική μορφή του όπου τα κυκλοτρόνια ήταν πολύ ογκώδη, επιτάχυναν θετικά φορτισμένα σωματίδια και οι απαιτήσεις τους για θωράκιση ήταν αυξημένες. Τα κυκλοτρόνια νέας γενιάς εκτός από το μικρό τους μέγεθος (baby cyclotron) είναι απλά στον χειρισμό και μπορούν να εγκατασταθούν σε χώρους πλησίον του νοσοκομείου. Τα κυκλοτρόνια αυτά, ονομάζονται «κυκλοτρόνια αρνητικών ιόντων» καθώς τα σωματίδια που επιταχύνουν είναι τα αρνητικά ιόντα υδρογόνου (H^-). Πρωτόνια ή δευτέρια επιταχύνονται μέσω εναλλασσόμενων ηλεκτρικών πεδίων. Τα σωματίδια αυτά παραμένουν σε κυκλική τροχιά από ισχυρά

μαγνητικά πεδία καθώς αυξάνουν την ενέργεια τους. Τα επιταχυνθέντα σωματίδια κατευθύνονται σε στόχους πυρήνων και μέσω της δράσης τους στον πυρήνα παράγουν ασταθή ισότοπα τα οποία εκπέμπουν ποζιτρόνια (εκ πομποί ποζιτρονίων). Για την παραγωγή εκπομπών ποζιτρονίων (β^+) για χρήση στην απεικόνιση με PET, τα κυκλοτρόνια παράγουν σωματίδια με ενέργεια 3-18MeV.

Οι παραχθέντες εκ πομποίβ⁺ μεταφέρονται σε μονάδα χημικής σύνθεσης για την παραγωγή του κατάλληλου ρφ. Τα ραδιονουκλίδια στην PET έχουν χρόνους ημιζωής μεταξύ 75 sec και 110 min. Το πλέον συχνά χρησιμοποιούμενο, στην ποζιτρονιακή απεικόνιση, ρφ είναι το **¹⁸F-Fluorodeoxyglucose (¹⁸F-FDG)**. Ένα κυκλοτρόνιο επιτάχυνσης αρνητικών ιόντων με χειρισμό μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Αλληλεπίδραση ποζιτρονίων (β^+) με την ύλη. Η ταυτόχρονη εκπομπή 2 φωτονίων σε αντίθετες κατευθύνσεις είναι η αρχή της ανίχνευσης σύμπτωσης (coincidence) και της απεικόνισης σύμπτωσης της ποζιτρονιακής τομογραφίας.

Κατά την χορήγηση του ρφ με εκ πομπούς ποζιτρονίων, τα ποζιτρόνια διανύουν μικρή τροχιά (3-4mm) εντός του σώματος και συναντούν ηλεκτρόνια (e⁻). Τα άτομα ή ιοντίζονται (το e⁻ εκπέμπεται) ή διεγείρονται (το e⁻ μεταβαίνει σε υψηλότερης ενέργειας στάθμη). Τα ποζιτρόνια (β^+) κινούνται σε τεθλασμένη τροχιά στην ύλη. Η τροχιά των φορτισμένων σωματίων β⁺ εξαρτάται από την ενέργεια, το φορτίο και τη μάζα του ποζιτρονίου καθώς και από την πυκνότητα της ύλης. Η μικρή διαδρομή του ποζιτρονίου και η μη παράλληλη διαδρομή των φωτονίων στη διαδικασία εξαύλωσης ποζιτρονίου-ηλεκτρονίου προκαλούν ανακρίβεια θέσης. Το ζεύγος ποζιτρονίου-ηλεκτρονίου διατηρεί μικρή υπολειπόμενη ορμή με αρνητική επίδραση στη ΔΙ του συστήματος.

Οι 2 ακτίνες-γ με ενέργεια 511 keV ταξιδεύοντας σε ακριβώς αντίθετες διαδρομές ανιχνεύονται από 2 κρυστάλλους του συστήματος PET οι οποίοι ευρίσκονται σε θέση 180°. Ορίζεται η γραμμή η οποία ενώνει τα 2 σημεία ανίχνευσης των φωτονίων της εξαύλωσης ως γραμμή απόκρισης (Line of response, LoR) αυτών. Καταγράφονται αληθείς, τυχαίες, σκεδαζόμενες και πολλαπλές συμπτώσεις. Η ανίχνευση των φωτονίων εξαύλωσης γίνεται από σύστημα ανιχνευτών-κρυστάλλων σε κυκλική διάταξη.

Εκτός από πραγματικά γεγονότα εξαύλωσης (true coincidences) τα οποία γίνονται αντιληπτά από τους κρυστάλλους-ανιχνευτές και οδηγούν στην ανακατασκευή της εικόνας, πιθανόν να ανιχνευθούν και άλλες ακτίνες γ, οι οποίες μπορεί να προήλθαν από εξαύλωση και στην πορεία κάποια απ' αυτές σκεδάσθηκε σε ενδιάμεσο ιστό και ανιχνεύθηκε από τους ανιχνευτές, σύμπτωση εκ σκεδάσεως (scatter coincidences). Ακόμη, μπορεί να ανιχνευθούν τυχαία γ-φωτόνια εξαύλωσης τα οποία προέρχονται από διαφορετικά γεγονότα, τυχαίες συμπτώσεις (random coincidences). Εάν τα σήματα των δύο ανιχνευτών δεν προέρχονται από γεγονός εξαύλωσης τότε η έξοδος του κυκλώματος σύμπτωσης θα είναι ένας μηδενικός παλμός και αυτά τα σήματα απορρίπτονται.

18.3. ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΙ-ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ PET

Ο τομογράφος PET αποτελείται από ένα δακτύλιο ανιχνευτών, ανάμεσα στους οποίους υπάρχει ενδοκρυσταλλικός χώρος.

Στην απεικόνιση με PET, χρησιμοποιούνται κρύσταλλοι σπινθηριστές από διάφορα υλικά όπως ο BGO, (bismuth germanate oxide) με αρίστη stop ring power (καθορίζει την απόσταση που το φωτόνιο θα σταματήσει με πλήρη εναπόθεση της ενέργειάς του) που εξαρτάται από την πυκνότητα και τον ενεργό ατομικό αριθμό του υλικού. Οι LSO (lutetium oxyortho silicate) και LYSO (lutetium yttrium oxyortho silicate) με μεγάλη απόδοση φωτός και ταχεία απόσβεση φωτός έχουν περίπου όμοια πυκνότητα και ενεργό ατομικό αριθμό με

τον BGO. Αξίζει να σημειωθεί ότι το στοιχείο lutetium (Lu) στη φύση αποτελείται από 2 ισότοπα Lu-175 και Lu-176 (κατά ένα μικρό ποσοστό 2,6%) το οποίο είναι ραδιενεργό και δημιουργεί ανεπιθύμητα μεμονωμένα συμβάντα στον ανιχνευτή επηρεάζοντας τις μετρήσεις χαμηλού ρυθμού.

Ο κρύσταλλος GSO (gadolinium oxyorthosilicate) με καλή ενεργειακή ΔΙ και όμοιο συντελεστή απόσβεσης φωτός με LSO & LYSO. Ο LaBr (lanthanum bromide) έχει άριστη ενεργειακή ΔΙ και ταχύτατη απόσβεση φωτός. Προτείνεται για συστήματα PET με έλεγχο χρόνου πτήσης PET-ToF (time-off light).

Στα συστήματα PET χρησιμοποιείται μεγάλος αριθμός μικρών κρυστάλλων 4-8mm (διατομές 4 x 4, 4 x 6, 6 x 6, 4 x 8 κλπ. και βάθος 20-30 mm). Οι ανιχνευτές οργανώνονται σε blocks. π.χ. μια ομάδα 8x8 κρυστάλλων αντιστοιχούν σε 2x2 (PMT). Περίπου 100 blocks σχηματίζουν έναν δακτύλιο ανιχνευτών. Το σύστημα έχει 3-4 πλήρεις δακτυλίους με blocks και προκύπτει αξονικό πεδίο του συστήματος (15-18 cm). 12000-18000 κρύσταλλοι απαιτούνται για να κατασκευασθεί ένα σύστημα PET.

Το μέγεθος κάθε μεμονωμένου κρυστάλλου σπινθηριστή ο οποίος χρησιμοποιείται σε ομάδα ανιχνευτού (block) εξαρτάται από το πεδίο εφαρμογής και καθορίζει την εσωτερική ΔΙ του συστήματος PET. Κρύσταλλοι LSO κατασκευάζονται (Proteus Inc, Ohio) με διαστάσεις (0.25 x 0.25mm²), (0.75x0.75mm²) ή (2.0x2.0mm²) για micro-PET και PET μελέτες. Άλλος συνδυασμός χρησιμοποιεί επίπεδους (9 x 18cm²) κρυστάλλους αποτελούμενους από στοιχεία (4 x 6mm²). Κάθε επίπεδος κρύσταλλος φέρει πλέον των 600 κρυσταλλικών στοιχείων τα οποία είναι σε ζεύξη με 15 PMT. Περίπου 28 επίπεδοι κρύσταλλοι απαιτούνται για έναν πλήρη δακτύλιο. Δηλ. 18000 στοιχεία κρυστάλλων.

Είναι προφανές ότι ο μεγάλος αριθμός κρυστάλλων και η πολύπλοκη κατασκευαστική σύνθεση αυξάνουν το κόστος των PET συστημάτων.

Σημαντικές ιδιότητες των κρυστάλλων στα συστήματα PET είναι η απόδοση ανίχνευσης, η ταχύτητα σπινθηρισμού-οι ταχύτεροι σπινθηριστές μειώνουν το νεκρό χρόνο- η σχετικά υψηλή παροχή φωτός, ο δείκτης διαθλάσεως, η μεγάλη πυκνότητα-μικρή αυτοαπορρόφηση, η σκληρότητα (μη εύθραυστο υλικό) και μη υγροσκοπικό υλικό. Η απώλεια ενέργειας ενός ποζιτρονίου στην μονάδα διαδρομής σ' ένα υλικό (stop ring power σε MeV/cm) εξαρτάται από την ενέργεια αυτού και από τις ιδιότητες του υλικού.

Καταγραφή σημάτων στην PET. Όταν δύο ανιχνευτές καταγράφουν ο καθένας μια ακτίνα γ, δημιουργούν ένα σήμα στην έξοδο τους. Τα σήματα αυτά, μετά από ενίσχυση και διευκρίνιση, οδηγούνται στο κύκλωμα σύμπτωσης (coincidence circuit), όπου διαπιστώνεται εάν προέρχεται από το ίδιο γεγονός εξαύλωσης. Τότε η θέση (x,y) των δύο ανιχνευτών καθορίζει τη γραμμή απόκρισης (LoR).

Κρύσταλλοι	NaI(Tl)	BGO	LSO	GSO
Ιδιότητες				
Ενεργός Ατομικός Αριθμός Z	51	74	66	59
Γραμμικός συντελεστής εξασθένησης cm ⁻¹	0.34	0.92	0.87	0.62
Δείκτης διάθλασης	1,85	2,15	1,82	1,85
Απόδοση φωτός (%NaI(Tl))	100	15	75	41
Μήκος κύματος κορυφής (Nm)	410	480	420	430
Σταθερά διάσπασης	230	300	40	53

Πίνακας 25: Συγκριτικός πίνακας των χαρακτηριστικών των κρυστάλλων BGO, LSO και GSO σε σχέση με τις ιδιότητες οι οποίες χαρακτηρίζουν τον κρύσταλλο NaI(Tl)

Κάθε στοιχείο ανιχνευτού συνδέεται με το κύκλωμα σύμπτωσης και χρονικό παράθυρο με τους απέναντι ανιχνευτές του δακτυλίου. Τα δεδομένα καταγράφονται σε δέσμη βεντάλιας. Όλες οι δυνατές λήψεις στην δέσμη για όλους τους ανιχνευτές καθορίζουν το πεδίο συμπτώσεων. Το σύνολο των γραμμών απόκρισης (LoR) το οποίο καταγράφεται, δίνει τη δυνατότητα ανακατασκευής της εικόνας, δηλ. την κατανομή της δραστηριότητας του προς εξέταση οργάνου, στην τομή η οποία ορίζεται από το επίπεδο του δακτυλίου του συστήματος PET.

Σένα σύστημα PET με πλήρη δακτύλιο χρησιμοποιούνται κατευθυντήρες μολύβδου ή βολφραμίου (septa) για το διαχωρισμό των ανιχνευτών γειτονικών δακτυλίων. Έτσι συμπτώσεις καταγράφονται από ανιχνευτές του ίδιου δακτυλίου ή εγγύς δακτυλίων μόνον. Αυτή η καταγραφή ονομάζεται 2 διαστάσεων (2D) τεχνική λήψης. Δηλαδή όλες οι συμπτώσεις στην ανακατασκευή μιας τομής ανιχνεύονται μόνον μέσα από αυτήν. Γεγονότα τα οποία διασχίζουν περισσότερες τομές απορρίπτονται.

Αν αποσυρθούν οι κατευθυντήρες (septa) καταγράφονται δεδομένα πρόσληψης απ' όλες τις πιθανές γωνίες σε 3 διαστάσεις (3D). Η τεχνική αυτή λήψης έχει ως αποτέλεσμα ουσιαστική αύξηση της απόδοσης των ανιχνευτών. Όλα τα συμβάντα που διασχίζουν εγκάρσιες τομές συλλέγονται και χρησιμοποιούνται για την ανακατασκευή κάθε τομής. Η 3D τεχνική λήψης έχει ελαφρά μειωμένη ΔΙ λόγω σημαντικής συνεισφοράς των ανεπιθύμητων σκεδαζόμενων και τυχαίων συμπτώσεων αλλά πολύ καλύτερη ευαισθησία σε σύγκριση με την 2D.

Τομογραφία ποζιτρονίων χρόνου πτήσεως (PET-ToF). Στην προσπάθεια βελτιώσεις της ποιότητας της ανακατασκευασμένης εικόνας χρησιμοποιήθηκε από πολύ νωρίς η διαφορά του χρόνου πτήσης (time of flight, ToF) των φωτονίων ενός γεγονότος εξαύλωσης. Είναι δυνατόν να εκτιμήσουμε σε ποιο σημείο της γραμμής απόκρισης (LoR) συνέβη η εξαύλωση, υπολογίζοντας τη διαφορά των χρόνων αφίξεως των φωτονίων στους 2 ανιχνευτές. Έστω ότι στο σημείο της γραμμής απόκρισης λαμβάνει χώρα ένα γεγονός εξαύλωσης. Οι ακτίνες-γ οι οποίες προκύπτουν από την σύμπτωση, ανιχνεύονται από τους αντίστοιχους ανιχνευτές.

Αν το σημείο εξαύλωσης απέχει από το μέσο της απόστασης των δύο ανιχνευτών κατά x , τότε για t_1 και t_2 χρόνο άφιξης των φωτονίων στους παραπάνω ανιχνευτές ισχύει: $d+x=cxt_1$, $d-x=cxt_2$ όπου δη μισή απόσταση των δύο ανιχνευτών και c η ταχύτητα του φωτός. Οι σημερινοί ToF-PET τομογράφοι έχουν επιτύχει τον προσδιορισμό χρόνου πτήσης με ακρίβεια $\delta T \approx 500$ psec.

Η πληροφορία από την εφαρμογή της μεθόδου ToF μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη βελτίωση της ανακατασκευής με οπισθοπροβολής, ώστε αυτή να μην πραγματοποιείται σε όλο το χώρο, αλλά μόνο στην περιοχή που ορίζει ο χρόνος πτήσης. Έτσι μειώνεται σημαντικά ο θόρυβος λόγω στατιστικών διακυμάνσεων με αποτέλεσμα να βελτιώνεται ο λόγος του Σήματος προς το Θόρυβο της εικόνας (signal to noise ratio, SNR). Επομένως και η ποιότητα της εικόνας.

Η αύξηση του λόγου SNR μπορεί να μεταφρασθεί σε κέρδος στην ευαισθησία του τομογράφου PET. Η χρήση του ToF, τελικώς, συντελεί στη βελτίωση της χωρικής ΔΙ, στη χορήγηση μικρότερης δόσης ενεργότητας και μέσω του εντοπισμού της πηγής επί της γραμμής απόκρισης στην βελτίωση της απεικόνισης ιδιαίτερα σε παχείς ασθενείς. Ανιχνευτές κατάλληλοι για την εφαρμογή ToF θεωρούνται οι κρύσταλλοι από φθοριούχο βάριο (BaF_2), βρωμιούχο λανθάνιο (LaBr_3) ή φθοριούχο σείριο (CeF_3) αλλά και νέοι ανιχνευτές ToF-PET βασισμένοι σε κρυστάλλους LOS ή LYSO. Πρέπει να έχουν καλή χρονική ΔΙ, σταθερή με τον χρόνο, για την αποφυγή συχνών επαναρρυθμίσεων των ανιχνευτών.

Παράγοντες επίδρασης στην εικόνα PET. Το μέγεθος των κρυστάλλων κατά την αζιμουθιακή διεύθυνση καθορίζει σε σημαντικό βαθμό τη χωρική ΔΙ του συστήματος PET. Όσο μικρότεροι κρύσταλλοι απαρτίζουν τον ανιχνευτή τόσο καλύτερη είναι η ΔΙ του. Το

εύρος των κρυστάλλων σχετίζεται με τη ΔΙ στο επίπεδο της τομής δηλ. με Δx, Δy. Η χωρική ΔΙ κατά τη διεύθυνση του άξονα εξαρτάται από το πάχος των κρυστάλλων κατά την αξονική διεύθυνση. Προσεγγιστικά μπορεί κανείς να θεωρήσει σαν χωρική ΔΙ το 1/2 του μεγέθους του κρυστάλλου, π.χ ένας τομογράφος με κρυστάλλους BGO μεγέθους (6x12x30mm²) κατά την αξιμουθιακή, αξονική και ακτινική διεύθυνση θα έχει αντίστοιχα χωρική ΔΙ Δx≈Δy≈3mm, Δz=6mm.

Η ΔΙ και η Απόδοση του συστήματος επηρεάζονται, επίσης, από την απόσταση των ανιχνευτών (διάμετρος των δακτυλίων των ανιχνευτών). Όσο πλησιέστερα ευρίσκονται οι ανιχνευτές μεταξύ τους και με την πηγή-εξεταζόμενο τόσο καλύτερη είναι η χωρική ΔΙ. Δυστυχώς όμως, όσο μικρότερη είναι η διάμετρος του δακτυλίου των ανιχνευτών τόσο πιθανότερη είναι η καταγραφή σκεδασμένων και τυχαίων συμπτώσεων. Η χωρική ΔΙ του συστήματος PET περιορίζεται και από αυτήν των ποζιτρονίων προ της εξαύλωσης και από το γεγονός ότι η γωνιακή τροχιά των 2 φωτονίων δεν είναι πάντα 180° (το εύρος τιμών των τροχιών ευρίσκεται σε μια κατανομή Gaussian) με μέσο εύρος 0,5° περίξ της τιμής των 180°.

Ο λόγος SNR εξαρτάται από τη στατιστική του αριθμού των γεγονότων εξαύλωσης β⁺ και e⁻ τα οποία χρησιμοποιήσαμε για την ανακατασκευή της εικόνας. Εάν ο αριθμός αυτός είναι μεγάλος τότε ο λόγος SNR είναι μεγάλος και η εικόνα έχει καλή αντίθεση (contrast). Το φαινόμενο του θορύβου ή υποστρώματος της εικόνας είναι στατιστικό και συνδέεται με τη μέθοδο της οπισθοπροβολής. Η διευκρίνιση της πληροφορίας γίνεται με τον υπολογισμό της διαφοράς χρόνου πτήσεως (Το ότι ο ιδανικός κρύσταλλος θα έπρεπε να συνδυάζει την παραγωγή φωτός του NaI(Tl), την ταχύτητα του BaF₂ και την απορροφητική ικανότητα του BGO.

18.4. ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ, PET, ΤΕΧΝΙΚΑ ΛΑΘΗ ΚΑΙ ΨΕΥΔΕΙΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

Είναι χρήσιμη η εφαρμογή ποιοτικού ελέγχου (QC) για να επιβεβαιωθεί ότι τα δεδομένα πληροφορίες λαμβάνονται ορθά και ποιος είναι ο τρόπος με τον οποίο τα δεδομένα λήψης επηρεάζουν το αποτέλεσμα. Όπως για κάθε τομογράφο, ο τομογράφος PET πρέπει να ελέγχεται ως προς τα χαρακτηριστικά του με στόχο την ικανοποιητική λειτουργία του. Οι διαδικασίες οι οποίες ακολουθούν είναι π.χ. καθημερινό blankscan (Ημιτονόγραμμα ομοιογένειας), κανονικοποίηση (normalization), ομοιογένεια (uniformity), χωρική ΔΙ (spatial resolution), ενεργειακή ΔΙ (energy resolution), ευαισθησία όγκου (volume sensitivity), ανιχνευτική απόδοση, γεωμετρική απόδοση, έλεγχος ρυθμού κρούσεων. Ο ποιοτικός έλεγχος γίνεται με ομοιώματα-εργαλεία ή πηγές γνωστών γεωμετρικών διαστάσεων και άλλων χαρακτηριστικών όπως τα ραδιοφάρμακα και οι ενεργότητες αυτών των πηγών.

Πολλές φορές βλάβες ή ψευδείς πληροφορίες ανιχνεύονται από το Ημιτονόγραμμα της απεικόνισης ή και ακόμη από τη ανακατασκευασμένη εικόνα και είναι πιθανή η άμεση διόρθωση της απεικόνισης. Π.χ. α) Αποτυχία ανιχνευτού. Συνήθως προκαλείται από βλάβη στους PMT που αντιστοιχούν σε έναν ή περισσότερους κρυστάλλους σπινθηρισμού. Είναι πιθανόν να εντοπιστεί στα ημιτονογράμματα. β) Ψευδής πληροφορία από σημείο υψηλής πρόσληψης αναγνωρίζεται κατά την ανακατασκευή. Με την ενσωμάτωση του CT επιτυγχάνεται ταχεία διόρθωση της εξασθένησης και προστίθενται ανατομικές πληροφορίες

18.5. ΧΑΡΤΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗΣ-(ATTENUATION CORRECTION, AC).

Πρωτόκολλο διάδοσης- Εκπομπής, οι πιθανές διαδρομές των εκπεμπόμενων φωτονίων στην τομογραφία εκπομπής SPET είναι διάφορες. Φωτόνια σκεδαζόμενα λόγω Compton μπορεί να φθάσουν στον ανιχνευτή προβαλλόμενα από περιοχές που δεν ξεκίνησαν. Φωτόνια τα οποία απορροφώνται στο σώμα, προκαλούν υποεκτίμηση της αληθούς πληροφορίας στην ανακατασκευασμένη εικόνα. Είναι γεγονός, ότι υπάρχει ένα τεράστιο πλήθος διαφορετικών κατασκευών σώματος, και ιδεατά καθένας θα είχε τη δική του «φυσιολογική κατανομή» στην SPET ή PET απεικόνιση. Η καλύτερη προσέγγιση στην αναγνώριση αυτής είναι οι διορθώσεις εξασθένησης να γίνονται εξειδικευμένες για κάθε άτομο.

Αν ο τύπος του ιστού σε κάθε στοιχειώδη όγκο μιας τομής ήταν γνωστός ή μπορούσε να μετρηθεί θεωρητικά, η εξισορρόπηση της εξασθένησης θα ήταν εφικτή και ποσοτικές μετρήσεις θα ήταν ακριβείς. Απαιτείται, π.χ. στην τομογραφία SPET μυοκαρδίου, η γνώση της γεωμετρίας και ο συνδυασμός συντελεστών εξασθένησης για τον πνεύμονα, αέρα, μαλακό ιστό και οστό.

Ιδιαίτερα, η εξισορρόπηση της απορρόφησης στην τομογραφία SPET καρδιάς γίνεται σύνθετη από το πλήθος των ιστών που αποτελούν το θώρακα. Οι ιδιότητες των ιστών του θώρακα κάνουν τις μεθόδους για διόρθωση σκέδασης στην τομογραφία καρδιάς σύνθετες.

Φωτόνια που εκπέμπονται από εν τω βάθει περιοχές έχουν σημαντικά υψηλότερη πιθανότητα να απορριφθούν, απ' ό,τι φωτόνια από επιφανειακές περιοχές. Η απαιτούμενη πληροφορία για την διόρθωση εξασθένησης μπορεί να εξαχθεί από σάρωση με τεχνική διάδοσης ταυτόχρονα ή κατ' ακολουθία με τη σάρωση εκπομπής. Αυτή θα χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία χάρτη εξασθένησης και τη διόρθωση κατά την ανασύσταση της εικόνας με προσεγγιστικές μεθόδους.

Η λήψη εικόνας διάδοσης με σύστημα ενός ανιχνευτού απαιτεί την κατ' ακολουθία εκτέλεση του, μετά το σπινθηρογράφημα εκπομπής. Με σύστημα πολλών ανιχνευτών, ο ένας ανιχνευτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί με συγκλίνοντα κατευθυντήρα, για τη δημιουργία χάρτη εξασθένησης με πηγή 57°C και δύο από αυτούς με κατευθυντήρες παράλληλων οπών να συλλέγουν δεδομένα εκπομπής. Πολλές φορές ο κατευθυντήρας απομακρύνεται και ο ρυθμός κρούσεων αυξάνει σημαντικά.

18.6. Η ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΗΓΗΣ ΠΕΡΙΟΡΙΖΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΡΥΘΜΟ ΚΡΟΥΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΟ ΝΕΚΡΟ ΧΡΟΝΟ ΤΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ

Σε συστήματα δύο ή τριών κεφαλών, η πηγή διάδοσης μπορεί να είναι γραμμική πηγή, με μήκος περίπου 40 cm και διάμετρο 1,5 mm είναι κλειστή πηγή, θωρακισμένη σε κέλυφος από ανοξείδωτο χάλυβα η οποία περιστρέφεται. Διάφορες πηγές ραδιονουκλιδίων έχουν επιλεγεί ως πηγές διάδοσης, με χαρακτηριστικά ενέργειας κατάλληλα για την απόκριση της γ-κάμερα. Ταυτόχρονη λήψη δεδομένων εκπομπής σε τομογραφίες μυοκαρδίου με 201_{Tl} ή $99m_{\text{Tc}}$ γίνονται με πηγή από γαδολίνιο-153 (153_{Gd}) με ενέργεια 99 keV και χρόνο ημιζωής αρκετά μεγάλο $T_{1/2}=242$ ημέρες (σχετικά μακρόβια πηγή).

Διόρθωση εξασθένησης με χρήση του αξονικού τομογράφου (CT), με την ενσωμάτωση του CT επιτυγχάνεται ταχεία διόρθωση της εξασθένησης και προστίθενται ανατομικές πληροφορίες. Ο αξονικός τομογράφος στα υβριδικά συστήματα SPET/CT, PET/CT χρησιμοποιείται για τη διόρθωση εξασθένησης των δεδομένων εκπομπής του ραδιονουκλιδίου SPET (ή PET). Η απεικόνιση με CT αντιπροσωπεύει έναν ανατομικό χάρτη

των γραμμικών συντελεστών εξασθένησης (μ) οι οποίοι αναδημιουργούνται από την ενέργεια της δέσμης των ακτίνων-X. Όταν η ανίχνευση CT χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τις τιμές μ για τη διόρθωση των δεδομένων από SPET (ή PET) λόγω της εξασθένησης φωτονίων, πρέπει να ρυθμιστεί ώστε να αντιπροσωπεύει τους γραμμικούς συντελεστές εξασθένησης στην ενέργεια φωτονίων του ραδιοϊσοτόπου το οποίο χρησιμοποιείται για να αποκτήσει τα δεδομένα εκπομπής (από SPET ή PET).

Γίνεται λήψη ακτινογραφίας ανίχνευσης (scoutscan) με μικρή δόση και κακή διακριτική ικανότητα μετακινώντας τον εξεταζόμενο στο πεδίο μετρήσεων με τη λυχνία ακτίνων-X σε σταθερή θέση. Η διεύθυνση της προβολής είναι συνήθως αυθαίρετη. Οι ανιχνευτικές ακτινογραφίες επιτρέπουν την επιλογή της θέσης και της κλίσης του δακτυλίου (gantry) του συστήματος για την επιλογή μεμονωμένων τομών ή ολόκληρης περιοχής σάρωσης.

Η προκύπτουσα τομογραφική εικόνα των γραμμικών συντελεστών εξασθένησης, συνήθως γνωστή ως χάρτης εξασθένησης (Attenuation map), μπορεί να ενσωματωθεί σε έναν επαναληπτικό αλγόριθμο ανακατασκευής για να διορθώσει το τομογράφημα (τομή SPET ή PET) από τα λάθη, λόγω της εξασθένησης φωτονίων. Για τη διόρθωση Εξασθένησης (attenuation correction, AC), η λήψη των δεδομένων από το CT γίνεται με αρκετά χαμηλότερη στατιστική ποιότητα και χωρική ΔΙ από την απαιτούμενη στη διαγνωστική απεικόνιση. Συνεπώς, εναποθέτουν σημαντικά χαμηλότερη απορροφούμενη δόση στον εξεταζόμενο από αυτή για μια διαγνωστική μελέτη CT.

Διόρθωση εξασθένησης βασισμένη σε μαγνητική τομογραφία (MRI-MR), η χρήση των εικόνων μαγνητικού τομογράφου (MRI) για να δημιουργηθούν χάρτες διόρθωσης εξασθένησης-attenuation correction (AC maps) δεν είναι τόσο απλή όσο αυτή με εικόνες από CT επειδή οι MRI εικόνες δεν αντιπροσωπεύουν τους χάρτες των συντελεστών εξασθένησης. Διαφορετικές προσεγγίσεις εξερευνώνται, προτείνοντας ότι η καλύτερη μέθοδος πρέπει να καθοριστεί ακόμα. Η δυσκολία είναι ότι οι MRI ανατομικές εικόνες χαρτογραφούν την πυκνότητα πρωτονίων ενώ η εξασθένηση των φωτονίων π.χ. σε PET μελέτη είναι ανάλογη προς την πυκνότητα ηλεκτρονίων. Η διάκριση καταδεικνύεται σαφώς από το γεγονός ότι και ο αέρας και το φλοιώδες οστό δε δίνουν κανέναν μετρήσιμο σήμα ενώ στον Αξονικό υπάρχει μια μεγάλη διαφορά 2500 HU (Hounsfield Unit, μονάδα μέτρησης) στις ιδιότητες εξασθένησης των φωτονίων των 2 παραπάνω υλικών. Περαιτέρω έρευνα θα πατηθεί για να προσδιορίσει την ακριβέστερη και αξιόπιστη μεθοδολογία για τη διόρθωση εξασθένησης στα υβριδικά συστήματα PET/MRI.

Στα συστήματα PET/MR, όπου η απευθείας μέτρηση της εξασθένησης των φωτονίων δεν είναι δυνατή, η AC υπολογίζεται με τη βοήθεια λογισμικού (MR-AC) τμήματοποίησης και ταυτοποίησης του τύπου του ιστού (αέρας, πνεύμονας, μαλακός ιστός) της εικόνας MR. Οι αλγόριθμοι για διόρθωση εξασθένησης MR-AC δίδουν καλά αποτελέσματα για μαλακό ιστό και τον αέρα. Εντούτοις, artifacts κίνησης, μετάλλου ή αποκοπής δυνατόν να καταγραφούν. Διόρθωση ψευδούς πληροφορίας λόγω κίνησης (εξεταζόμενου ή φυσιολογικών λειτουργιών αυτού) στην PET μέσω μαγνητικής τομογραφίας είναι χρήσιμη για τη μείωση του φαινομένου κακής εγγραφής (malregistration).

18.7. ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗΣ (AC) ΚΑΙ ΠΙΘΑΝΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ

Τα φωτόνια τα οποία απορροφώνται στον ιστό, εναποθέτουν την ενέργεια τους και έτσι παραμένουν μη ανιχνεύσιμα και οδηγούν στο αποτέλεσμα των «ψευδών πληροφοριών» (artifacts) λόγω εξασθένησης. Το φαινόμενο αποτελεί, πολλές φορές, σημαντικό εμπόδιο στην ερμηνεία των εικόνων. «Ψευδής πληροφορία» (artifact) παρατηρείται συχνά σε άνδρες με το

αριστερό ημιδιάφραγμα να επισκιάζει το κατώτερο τμήμα του μυοκαρδίου και σε γυναίκες με μεγάλο ή πυκνό στήθος.

Η AC διορθώνει την ψευδή μείωση της ακτινοβολίας η οποία προκαλείται από την εξασθένηση, έτσι ώστε η απεικόνιση να αντιπροσωπεύει την πραγματική καθήλωση ραδιενέργειας στο όργανο. Δίδει τη δυνατότητα βελτίωσης της ποιότητας της εικόνας και της ακρίβειας των μετρήσεων με τη διόρθωση ψευδών πληροφοριών (artifacts) και της ταχύτητας λήψης εικόνας. Όμως πολλές φορές, σφάλματα (ακρίβεια, θόρυβος χωρική διακριτική ικανότητα, αποκοπή πεδίου) εμφανίζονται στον καθορισμό του χάρτη εξασθένησης, στη διόρθωση του φαινομένου σκέδασης, στην απόκριση ανιχνευτή-κατευθυντήρα στη SPET και στη μη ταύτιση δεδομένων διάδοσης και εκπομπής.

Σε μακρούς χρόνους εξέτασης οι πιθανότητες να κινηθεί ο εξεταζόμενος αυξάνουν και προκαλείται ψευδής πληροφορία (artifact) κίνησης ασθενούς (motionartifacts). Ακόμη ψευδείς πληροφορίες εμφανίζονται στις τομές όταν η διόρθωση γίνεται με CT και χρήση σκιαγραφικών ή υπάρχει βηματοδότης στον εξεταζόμενο.

Μεταλλικά εμφυτεύματα δημιουργούν artifacts στις εικόνες CT, τα οποία εμφανίζονται και στις λειτουργικές εικόνες PET με τη διαδικασία της διόρθωσης εξασθένησης (AC) σε υβριδικά συστήματα PET/CT. Ψευδείς πληροφορίες (artifacts) στην απεικόνιση και μη αξιόπιστες μετρήσεις της πρόσληψης του ραδιοφαρμάκου είναι πιθανές.

Βελτίωση της ποιότητας και ακριβής ποσοτικοποίηση της εικόνας απαιτεί την εφαρμογή του λογισμικού «μείωση artifactμετάλλου» (MAR, metal artifact reduction) στις εικόνες CT πριν από την εφαρμογή της διόρθωσης εξασθένησης AC στην PET. Όταν η στατιστική των τομών είναι χαμηλή είναι προτιμότερο να μην αφαιρείται το υπόστρωμα γιατί η εικόνα του οργάνου φαίνεται ανομοιογενής και απεικονίζεται ψευδής πληροφορία (artifact) κακής στατιστικής.

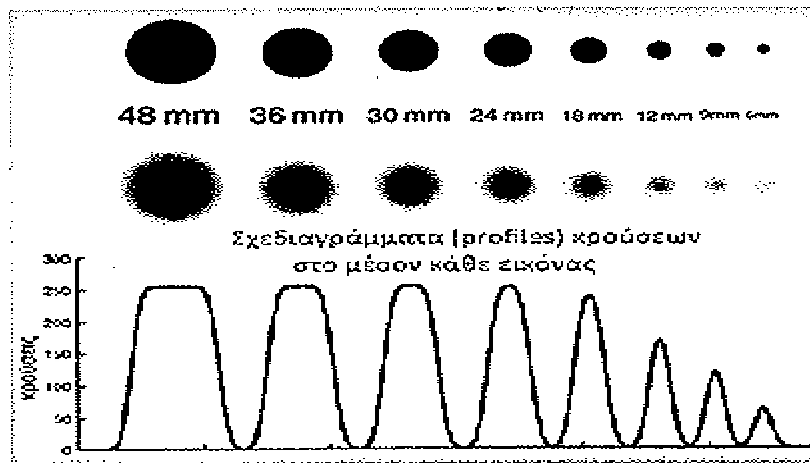
18.8. ΜΕΡΙΚΗ ΑΠΩΛΕΙΑ ΟΓΚΟΥ (PARTIAL VOLUME EFFECT, PVE)

Ο ακριβής ποσοτικός προσδιορισμός σε PET και SPET απαιτεί τη διόρθωση για διάφορους φυσικούς παράγοντες, όπως η εξασθένηση φωτονίων και οι τυχαίες συμπτώσεις (στην PET) ή το μέγεθος του κρυστάλλου, η γεωμετρία του κατευθυντήρα (στη SPET) καθώς και οι διαδικασίες λήψης και ανακατασκευής. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας ο οποίος έχει επιπτώσεις στον προσδιορισμό της ποσότητας είναι η περιορισμένη ΔΙ ο οποίος προκαλεί το φαινόμενο της μερικής απώλειας όγκου (partial volume effect, PVE).

Η PVE ορίζεται ως η απώλεια προφανούς ενεργότητας σε μικρά αντικείμενα η περιοχές λόγω περιορισμένης ΔΙ του συστήματος απεικόνισης. Η PVE περιλαμβάνει δύο φυσικά φαινόμενα, τα οποία επιδρούν αρνητικά στην ποιότητα των τομογραφικών εικόνων προσδίδοντας θολότητα αλλά και ποσοτική ανακρίβεια των συστημάτων SPET και PET. Εμφανίζεται στην τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων (PET) και τη SPET. Εάν το αντικείμενο ή η περιοχή προς απεικόνιση είναι λιγότερο από δύο φορές το εύρος της ΔΙ στην x,y και την z- διάσταση του συστήματος απεικόνισης, η τελική ραδιενέργεια στο αντικείμενο ή την περιοχή υποτιμάται. Βελτίωση της ΔΙ μειώνει αυτήν την επίδραση, δεδομένου ότι διαχωρίζει καλύτερα τον ιστό.

Η μερική απώλεια όγκου (PVE) εμφανίζεται κυρίως όταν η περιβάλλουσα το αντικείμενο ή την περιοχή ραδιενέργεια είναι μηδέν. Η απώλεια ραδιενέργειας στο αντικείμενο περιλαμβάνει και αύξηση στη ραδιενέργεια στις παρακείμενες περιοχές, οι οποίες θεωρούνται εκτός αντικειμένου, φαινόμενο το οποίο ονομάζεται spillover (ξεχειλίσμα). Για ένα μικρό αντικείμενο (π.χ., ένα voxel) ή ένα αντικείμενο με μέγεθος συγκρίσιμο με τη ΔΙ του συστήματος απεικόνισης, η συνολική παρατηρηθείσα ενεργότητα

είναι το άθροισμα της ενεργότητας με τη δράση του φαινομένου της PVE και το spillover από τις παρακείμενες περιοχές. Αν και η PEV και το spillover, αναφέρονται ουσιαστικά στο ίδιο φυσικό πρόβλημα, είναι σημαντικό να διακριθεί η έκβαση αυτών των δύο διαφορετικών αποτελεσμάτων.



Σχήμα 21: Κατανομές κρούσεων μέσω του κέντρου των εικόνων. Απεικόνιση της μερικής απώλειας όγκου (PVE).

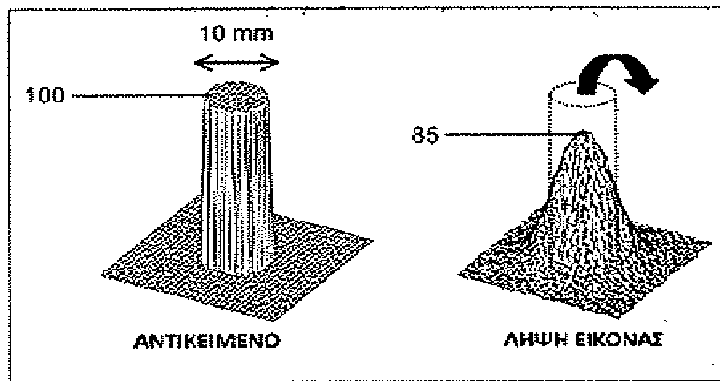
Στο Σχήμα 21 οι κύλινδροι στην κορυφαία σειρά έχουν τις διαμέτρους οι οποίες κυμαίνονται από 6 ως 48mm, και κάθε μια περιέχει την ίδια συγκέντρωση του ραδιοϊσοτόπου. Η μέση σειρά παρουσιάζει τις εικόνες από την ανίχνευση αυτών των κυλίνδρων σε ένα σύστημα SPET με χωρική $\Delta I=12\text{mm}$. Οι κύλινδροι είχαν ύψος πολύ μεγαλύτερο από την αξονική ΔI . Η κατώτατη σειρά παρουσιάζει κατανομές κρούσεων μέσω του κέντρου των εικόνων. Αν και κάθε κύλινδρος περιέχει την ίδια συγκέντρωση του ραδιοϊσοτόπου, η ένταση, και επομένως η συγκέντρωση, εμφανίζεται να μειώνεται όταν το μέγεθος κυλίνδρων πλησιάζει ή γίνεται μικρότερο από την ΔI του συστήματος SPET (ή PET)

Με την PVE, η προφανής απώλεια ενεργότητας στο αντικείμενο διανέμεται στα παρακείμενα voxels, τα οποία θεωρούνται εκτός αντικειμένου, με συνέπεια την αύξηση της ενεργότητας σε αυτά τα voxels. Η μέθοδος η οποία διορθώνει την επίδραση PEV αναφέρεται ως μερική διόρθωση όγκου (partial volume correction, PVC). Πολύ απλή μέθοδος για τη διόρθωση PVE είναι η χρήση του συντελεστή αποκατάστασης (recovery coefficient, RC). Για την εφαρμογή της μεθόδου, πολλαπλασιάζεται η μετρηθείσα τιμή πρόσληψης, στην περιοχή ενδιαφέροντος, με τον παράγοντα διόρθωσης RC. Το RC προϋπολογίζεται για αντικείμενο του οποίου το μέγεθος και το σχήμα είναι παρόμοια με αυτά του αντικειμένου ενδιαφέροντος.

18.9. ΜΕΡΙΚΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΟΓΚΟΥ (PVC) ΜΠΟΡΕΙ ΝΑ ΕΠΙΤΕΥΧΘΕΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΦΙΛΤΡΟΥ

Η PET έχει το ανεκτίμητο πλεονέκτημα να είναι ενδογενώς πραγματικά ποσοτική, επιτρέποντας τις ακριβείς μετρήσεις της συγκέντρωσης $q\mu$ σε ζώντα οργανισμό (in vivo). Στην απεικόνιση βλαβών στον οργανισμό με PET, οι δείκτες οι οποίοι χαρακτηρίζουν την πρόσληψη αυτών, όπως οι πρότυπες τιμές πρόσληψης (standardized uptake values, SUV), γίνονται όλο και περισσότερο σημαντικοί, ειδικά στα πλαίσια του ελέγχου της ανταπόκρισης στη θεραπεία. Εντούτοις, κατά τη μέτρηση της πρόσληψης ραδιενέργειας σε μικρούς όγκους,

εισάγονται ανακρίβειες από την μερική απώλεια όγκου (PVE) οι οποίες πρέπει να διορθώνονται.



Σχήμα 22: Η Κυκλική πηγή ομοιόμορφης ραδιενέργειας σε μη ραδιενεργό υπόβαθρο παράγει την εικόνα στην οποία μέρος του σήματος το οποίο προέρχεται από την πηγή καταγράφεται εκτός της πραγματικής πηγής. Η μεγίστη καταγραφή ραδιενέργειας στην εικόνα μειώνεται κατά 85%

18.10. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ

Η τεχνολογική έρευνα έχει εξελιχθεί σημαντικά δεδομένου ότι η πρώτη γ-κάμερα δημιουργήθηκε από τον Anger στη δεκαετία του '50 με βασική αρχή την ίδια μέχρι σήμερα με την πρόσφατη εμφάνιση των ημιαγωγών στους ανιχνευτές, η τεχνολογική ανάπτυξη στην πυρηνική ιατρική είναι σε εξέλιξη. Αυτοί οι ανιχνευτές προσφέρουν υψηλότερη ΔΙ και μεγαλύτερη ευαισθησία

Οι τεχνολογικές εξελίξεις σχεδόν αποκλειστικά παράγονται από τη βιομηχανία σε συνεργασία πολλές φορές με τεχνολογικά πανεπιστημιακά εργαστήρια. Οι ερευνητές δραστηριοποιούνται στον τομέα της ανάπτυξης λογισμικού, ιδιαίτερα στους τομείς της διόρθωσης, της ανακατασκευής, της σύντηξης, και της ποσοτικοποίησης της εικόνας. Ενδιαφέρον επίσης εστιάζεται στις βάσεις δεδομένων της πυρηνικής ιατρικής, αλλά και ολόκληρο το χώρο της ιατρικής απεικόνισης. Ακόμη, η ενσωμάτωση PET και CT και η εφαρμογή τους στις κλινικές και προ κλινικές απεικονιστικές μελέτες καταδεικνύουν την επιτυχή συνεργία της σύντηξης ανατομικών και λειτουργικών απεικονίσεων.

Έναντι του CT, το MRI έχει 3 κρίσιμα πλεονεκτήματα: καλύτερη αντίθεση μαλακών ιστών, ταυτόχρονη απεικόνιση με SPET ή PET σε ειδικές συνθήκες και χωρίς επιπλέον επιβάρυνση από ιοντίζουσα ακτινοβολία. Χρησιμοποιώντας τα νέα πλεονεκτήματα, η σύνθεση της PET ή της SPET με MRI είναι η πλέον πρόσφατη σημαντική πρόοδος στις εξελίξεις απεικόνισης.

19. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΑΠΟΤΡΟΠΗ

19.1. ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΑ ΟΠΛΑ

Η θεωρία της πυρηνικής αποτροπής και οι στρατηγικές μελέτες γενικότερα υπάρχουν, διασυνδέονται και αφορούν τη χρήση στρατηγικών οπλικών συστημάτων. Είναι απαραίτητο λοιπόν να παρουσιασθούν αυτά τα οπλικά συστήματα, έτσι ώστε ο αναγνώστης να μπορέσει να αντιληφθεί τον ρόλο τους στη διαμόρφωση της αποτροπής αλλά και την αποστολή τους σύμφωνα με τη θεωρία της αποτροπής.

Ως στρατηγικά όπλα περιγράφονται κατ' αρχήν εκείνα τα οποία μπορούν να κρίνουν αποφασιστικά ή να καθορίσουν την έκβαση ενός πολέμου. Ως κατ' εξοχήν στρατηγικά όπλα θεωρούνται τα πυρηνικά όπλα και όσα οπλικά συστήματα σχετίζονται με αυτά. Ειδικότερα, ως στρατηγικά εκλαμβάνονται τα οπλικά συστήματα τα οποία επιτρέπουν τη χρήση των πυρηνικών σε μεγάλες αποστάσεις, όπως οι πύραυλοι μέσου και μεγάλου βεληνεκούς, τα βαριά βομβαρδιστικά μεγάλου βεληνεκούς και φυσικά τα δορυφορικά συστήματα που συνδέονται με όλα αυτά τα μέσα και επιτρέπουν την αποτελεσματική χρήση τους. Τα στρατηγικά όπλα διακρίνονται από τα τακτικά όπλα, συμβατικά και πυρηνικά, που χρησιμοποιούνται στα θέατρα των επιχειρήσεων.

19.1.1. Πυρηνικά όπλα

«Πυρηνικά όπλα» είναι ο γενικός όρος που προσδιορίζει και περιγράφει κάθε όπλο που χρησιμοποιεί την πυρηνική ενέργεια. Διακρίνονται δύο τύποι :τα πυρηνικά(η ατομικά η ατομική βόμβα) και τα θερμοπυρηνικά όπλα (η βόμβα υδρογόνου). Η καταστρεπτική ενέργεια της πυρηνικής βόμβας εκλύεται από την διάσπαση πυρήνων ουρανίου και πλουτωνίου σε ποιο ελαφρά στοιχεία. Στην περίπτωση της θερμοπυρηνικής βόμβας ή βόμβας υδρογόνου η ενέργεια εκλύεται από την σύντηξη πυρήνων βαρέων ισοτόπων του υδρογόνου (δευτερίου και τριτίου). Σήμερα είναι δυνατή η κατασκευή της βόμβας νετρονίου ή «όπλου ενισχυμένης ακτινοβολίας» όπως και της βόμβας «περιορισμένης» η «ελάχιστης ακτινοβολίας».

Η εκρηκτική ισχύς των πυρηνικών όπλων είναι απεριόριστη και θεωρητικά δεν υπάρχει όριο στα μεγέθη ισχύος που μπορούν να εκλυθούν. Η ισχύς αυτή εκφράζεται από την ενέργεια που απελευθερώνεται κατά την έκρηξη σε σύγκριση με εκείνη που παρέχει μία ισοδύναμη έκρηξη του χημικού εκρηκτικού τρινιτροτολουόλη, γνωστού ως TNT. Για παράδειγμα, οι πιο μεγάλες συμβατικές βόμβες θα μπορούσαν να φθάσουν την εκρηκτική ισχύ των 10 τόνων TNT. Η έκρηξη μιας βόμβας 1 κιλοτόνου (KT) απελευθερώνει ισχύ 1.000 τόνων TNT, ενώ μια βόμβα ενός μεγατόνου (MT) απελευθερώνει ισχύ 1.000 κιλοτόνων ή ενός εκατομμυρίου τόνων TNT.

Διακρίνουμε δύο κατηγορίες καταστροφικών αποτελεσμάτων που παράγονται από μία πυρηνική έκρηξη. Τα αποτελέσματα της πρώτης κατηγορίας μοιάζουν με εκείνα που χαρακτηρίζουν τα πυρηνικά. Πρώτον, παρουσιάζουν μεγάλη και έντονη ακτινοβολία που περιλαμβάνει ακτίνες X και Γ στην αρχική φάση της έκρηξης. Δεύτερον, η ραδιενέργεια που

προκύπτει από την έκρηξη όπως και τμήματα των καταστραμμένων στόχων που αιρούνται στην ατμόσφαιρα από το «μανιτάρι» μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις. Τέλος, εμφανίζουν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα που είναι εξαιρετικά ισχυρό τη στιγμή της έκρηξης και προκύπτει από την έκλυση μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας σε χώρο πολύ περιορισμένου όγκου. Αυτό όμως που προσδιορίζει τα πυρηνικά όπλα ως τα κατ'εξοχήν «όπλα μαζικής καταστροφής» και τα κάνει τρομακτικά δεν είναι οι άμεσες και βραχυπρόθεσμες καταστροφικές τους συνέπειες, αλλά οι μακροπρόθεσμες βιολογικές, ψυχολογικές, κοινωνικές, οικονομικές και πολιτικές συνέπειες στον άνθρωπο και στο περιβάλλον.

19.1.2. ΗΠΑ και πυρηνικά

Η πρώτη δοκιμή πυρηνικού όπλου έγινε από τις ΗΠΑ στο Αλαμαγκόρντο του Νέου Μεξικού στις 14.7.1945. Επίσημως όμως οι ΗΠΑ απέκτησαν πυρηνικά όπλα με την χρήση βομβών κατά της Ιαπωνίας: μία 14 ΚΤ TNT στη Χιροσίμα στις 6.8.1945 και μία 20 ΚΤ TNT στο Ναγκασάκι στις 9.8.1945. Η συγκεκριμένη χρήση σηματοδότησε και συμβόλισε την είσοδο της ανθρωπότητας στην εποχή του ατόμου και ταυτόχρονα αποτέλεσε και χρησιμοποιήθηκε ως επίδειξη της αμερικάνικης ισχύος.

Οι ΗΠΑ διέθεταν αρχικά δύο τύπους της ατομικής βόμβας. Η πρώτη τύπου «implosion», ήταν όμοια με την βόμβα «fat-man», που χρησιμοποιήθηκε στο Ναγκασάκι, και η δεύτερη τύπου «gun», όμοια με την «littleboy», που χρησιμοποιήθηκε στην Χιροσίμα. Τα στοιχεία των βομβών αυτών ήταν χειροποίητα και οι βόμβες έπρεπε να συναρμολογηθούν πριν την χρησιμοποίησή τους. Οι βόμβες ήταν ογκώδεις και η μεταφορά τους απαιτούσε τη μετατροπή των βομβαρδιστικών. Οι βόμβες «fatmen» ζύγιζαν 4.5 τόνους και είχαν ισχύ 22 ΚΤ TNT. Οι βόμβες «gun» ζύγιζαν 4 τόνους και είχαν εκρηκτική ισχύ 12.5 ΚΤ TNT. Οι περισσότερες βόμβες που είχαν αρχικά παραχθεί ήταν του πρώτου τύπου.

Η ανάπτυξη του ατομικού οπλοστασίου των ΗΠΑ ήταν αργή. Σύμφωνα με ένα συνδυασμό πληροφοριών από ιστορικούς το ατομικό οπλοστάσιο των ΗΠΑ στα πρώτα μεταπολεμικά χρόνια αποτελείτο από:

Ημερομηνία	Στοιχεία πυρηνικά		Στοιχεία μη πυρηνικά	
	Τύπος: <<gun>><<implosion>>		Τύπος <<gun>>implosion>>	
30.6.1945	0	2	0	2
30.6.1946	0	9	0	9
30.6.1947	0	13	0	29
30.6.1948	0	50	2	53
μετά 1950	(πάνω από)			100

Πίνακας 26: Πυρηνικό οπλοστάσιο ΗΠΑ:1945-1950

19.1.3. ΕΣΣΔ και πυρηνικά

Το ενδιαφέρον των Σοβιετικών για την απόκτηση πυρηνικών όπλων προϋπήρχε του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Ο σοβιετικός ιστορικός Νέκριτς γράφει ότι την ημέρα της ναζιστικής εισβολής στην ΕΣΣΔ (22.6.1941) η Πράβντα, η οποία σημειωτέον δεν έκανε λόγο

για την εισβολή, ανήγγειλε ότι ο πρώτος αντιδραστήρας είχε κατασκευασθεί, με στόχο να επιχειρηθεί η διάσπαση του ατόμου.

Το ενδιαφέρον διατηρήθηκε και κατά τη διάρκεια του πολέμου. Τούτο μαρτυρούν οι υποθέσεις κατασκοπείας στον Καναδά και στο Ηνωμένο Βασίλειο και η μαρτυρία στρατάρχη Ζουκόφ για τη συζήτηση μεταξύ Στάλιν και Μολότοφ στο Πότσδαμ με αντικείμενο την ανάγκη επιτάχυνσης των ερευνών στα πυρηνικά.

Στη μεταπολεμική περίοδο δηλώσεις σχετικά με την αύξηση της οικονομικής και στρατιωτικής δύναμης της ΕΣΣΔ γενικά και την απόκτηση των μυστικών της πυρηνικής ενέργειας ειδικότερα γίνονταν πάρα πολύ συχνά. Στις 6 Φεβρουαρίου 1946 στη Μόσχα ο Μολότοφ πληροφορούσε ότι η ΕΣΣΔ έκανε ό,τι ήταν δυνατόν στον τομέα «των πλέον πρόσφατων τύπων εξοπλισμών», με στόχο να μην υστερεί ο σοβιετικός στρατός έναντι ουδενός». Το πενταετές πρόγραμμα του Μαρτίου 1946 προέβλεπε «την έρευνα στα προβλήματα της ατομικής ενέργειας για τις ανάγκες των μεταγορών και της βιομηχανίας».

Τον Σεπτέμβριο του 1946 ο Στάλιν σε συνέντευξη δήλωνε ότι, παρά το μονοπώλιο της ατομικής βόμβας δημιουργεί μία απειλή, ή κατάσταση μπορούσε να βελτιωθεί, διότι ένα μονοπώλιο δεν μπορούσε να διατηρηθεί για πάντα. Ακόμη ο Μολότοφ κατά τον εορτασμό της 30^{ης} επετείου της Οκτωβριανής Επανάστασης δήλωσε ότι το μυστικό της ατομικής βόμβας «έπαψε από καιρό να αποτελεί ένα μυστικό».

Στις 9.9.1949 η CIA παρατήρησε στην περιοχή του βορείου Ειρηνικού επίπεδα ραδιενέργειας υψηλότερα του κανονικού. Μετά από επαλήθευση οι κυβέρνησης Αμερικής, Αγγλίας και Καναδά ανακοίνωσαν ότι είχαν αποδείξεις πώς κατά τις προηγούμενες εβδομάδες μία πυρηνική βόμβα είχε εκραγεί στην ΕΣΣΔ. Ως η ημερομηνία προσδιορίστηκε η 29.8.1949.

Οι Σοβιετικοί διέψευσαν το γεγονός και υποστήριξαν πώς οι Δυτικοί έκαναν λάθος, καθώς εκείνοι γνώριζαν τα μυστικά της πυρηνικής ενέργειας από καιρό. Ο Μολότοφ, είπε ότι είχε ανακοινώσει επισήμως το 1947: Η ΕΣΣΔ είχε ανακαλύψει τα μυστικά των πυρηνικών όπλων και ήδη τα είχε στη διάθεσή της. Στα πλαίσια των σχετικών με την κατοχή πυρηνικών όπλων δηλώσεων Αμερικάνοι και Σοβιετικοί διακήρυτταν την προσήλωση τους στην ανάγκη ελέγχου αυτών των όπλων. Παρά τις δηλώσεις η κούρσα των εξοπλισμών είχε για τα καλά αρχίσει. Οι Αμερικάνοι είχαν χάσει ένα μονοπώλιο και, παρά το ότι δεν είχαν απολέσει την υπεροχή, η επιτυχία των Σοβιετικών δεν ήταν παρά ένα σήμα προς την κατεύθυνση. Οι Σοβιετικοί μπορούσαν να πάρουν ανάσα, αλλά γνώριζαν ότι η ισορροπία δεν είχε επιτευχθεί και ότι οι ΗΠΑ δεν θα έμεναν με σταυρωμένα χέρια.

Τον Νοέμβριο του 1952 οι Αμερικάνοι έφεραν σε πέρας το σχέδιο τους «Ivy» και δοκίμασαν μία θερμοπυρηνική βόμβα. Η εκρηκτική της ισχύς ήταν της τάξης των 10,4 ΜΤ. Οι Σοβιετικοί τους ακολουθούσαν το 1953, αλλά σύμφωνα με δυτικές εκτιμήσεις η ισχύς της βόμβας τους δεν ξεπερνούσε τους 200 με 300 ΚΤ. Η διαφορά ισχύος μεταξύ της αμερικάνικης βόμβας και της δικής τους ήταν τεράστια. Γι' αυτό ξανάπιασαν δουλειά και το 1955 πέτυχαν μία έκρηξη της τάξης του 1,4 ΜΤ.

19.1.4. Πυρηνικές δοκιμές

Απόδειξη της κατασκευής, ανάπτυξης και τελειοποίησης των πυρηνικών όπλων είναι οι δοκιμές. Μέχρι το 1988 έξι κράτη είχαν προβεί σε πυρηνικές δοκιμές: οι ΗΠΑ, η ΕΣΣΔ, η Κίνα, η Γαλλία, το Ηνωμένο βασίλειο και η Ινδία οποία προέβει σε υπόγεια πυρηνική δοκιμή το 1974. Όλοι οι στατιστικοί πίνακες κάνουν διάκριση μεταξύ υπόγειων και ατμοσφαιρικών δοκιμών. Σύμφωνα με έγγραφο της Συνδιάσκεψης για τον Αφοπλισμό του ΟΗΕ τα διάφορα κράτη προέβησαν μεταξύ 1945 και 193 στις παρακάτω δοκιμές:

	Κίνα	ΗΠΑ	Γάλλια	Ινδία	Η.Β	ΕΣΣΔ	ΣΥΝΟΛΟ
Ατμοσφαιρικές	22	212	45	-	21	161	461
Υπόγειες	5	544	75	1	16	368	1009
Σύνολο	27	756	120	1	37	529	1490

Πίνακας 27: Ατμοσφαιρικές δοκιμές το 1945

Το ποσοστό των δοκιμών που αντιστοιχεί στις ΗΠΑ και στην ΕΣΣΔ μαζί ανέρχεται στο 87% του συνόλου, ενώ αυτό των ατμοσφαιρικών δοκιμών τους ανέρχεται στο 82% της εν λόγω κατηγορίας δοκιμών. Τα ποσοστά όμως αυτά δεν αντανακλούν τη συχνότητα (και την ισχύ) των ατμοσφαιρικών δοκιμών των δύο χωρών, οι οποίες διέκοψαν τις ατμοσφαιρικές δοκιμές μετά τη Συνθήκη μερικής απαγόρευσης των πυρηνικών δοκιμών (1963). Ο πίνακας που ακολουθεί δείχνει τις ατμοσφαιρικές δοκιμές που έγιναν πριν από το 1963

	ΗΠΑ	Γάλλια	Η.Β	ΕΣΣΔ	ΗΠΑ/ΕΣΣΔ	ΣΥΝΟΛΟ
Ατμοσφαιρικές	212	4	21	161	373	398
Ποσοστό	53	1	5,27	40,42	93,45	%

Πίνακας 28: Ατμοσφαιρικές δοκιμές το 1963

Αυτός ο πίνακας δείχνει ότι το ποσοστό των ατμοσφαιρικών δοκιμών που αναλογεί στις ΗΠΑ και στην ΕΣΣΔ είναι πολύ πιο σημαντικό, αν το συγκρίνουμε με εκείνες άλλων κρατών κατά την ίδια περίοδο. Επιπλέον, καθώς οι γαλλικές και βρετανικές δοκιμές έγιναν στην επιφάνεια της γης και οι κινέζικες δυνάμεις από το 1964 και μετά έγιναν στην υψηλή ατμόσφαιρα, καταλήγουμε στο ότι όλες οι δοκιμές που έγιναν στο διάστημα προκλήθηκαν από τις ΗΠΑ και την ΕΣΣΔ.

Η σημασία των δοκιμών στην υψηλή ατμόσφαιρα και στο διάστημα σχετίζεται με την μελέτη της συμπεριφοράς των δορυφόρων και των πυραύλων σε περιβάλλον υψηλής ραδιενέργειας. Ένα καλό παράδειγμα είναι το σχέδιο «Argus», το οποίο είχε ως στόχο τη δημιουργία αντιδορυφορικών όπλων στην βάση πυρηνικών εκρήξεων. Για τον λόγο αυτό η εκτόξευση του δορυφόρου «Explorer-4» στις 26.7.1958, του οποίου και μελετήθηκε η συμπεριφορά σε περιβάλλον υψηλής ραδιενέργειας, προηγήθηκε των συγκεκριμένων πυρηνικών δοκιμών.

Οι ΗΠΑ και η ΕΣΣΔ απέκτησαν μέσω αυτών των δοκιμών πολύ σημαντικές γνώσεις για τους δορυφόρους, τους πυραύλους και τα αντιβαλιστικά τους συστήματα που οι άλλες χώρες δεν διαθέτουν. Οι γνώσεις για την συμπεριφορά των δορυφόρων μπορούν να εφαρμοσθούν στους πυραύλους και αντιστρόφως, καθώς πύραυλοι και δορυφόροι χρησιμοποιούν παρόμοια συστήματα πλοήγησης και αδράνειας και τα ηλεκτρονικά τους συστήματα είναι το ίδιο ευαίσθητα στη ραδιενέργεια υψηλής έντασης. Η σημασία των πυρηνικών δοκιμών στην ατμόσφαιρα και στο διάστημα έγινε αισθητή λίγο πριν από την επικύρωση της Συνθήκης για την απαγόρευση των δοκιμών του 1963. Ένα μέρος της επιστημονικής κοινότητας αντιτάχθηκε στη Συνθήκη, γιατί πίστευε ότι η συνέχιση αυτών των δοκιμών ήταν απαραίτητη για την ανάπτυξη των αντιπυραυλικών συστημάτων.

19.1.5. Επιθετικοί βαλλιστικοί πυραύλοι

Η χρήση ρουκετών η πυραυλικών συστημάτων στον πόλεμο χρονολογείται από την αρχαιότητα. Ο Γιασάνι γράφει ότι οι Κινέζοι είχαν με βεβαιότητα χρησιμοποιήσει ρουκέτες γύρω στο 1000 π.Χ. Η χρήση ρουκετών ως τακτικού όπλου είναι ιδιαίτερα έντονη κατά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο από τους Αμερικάνους και κυρίως από τους Σοβιετικούς. Οι πρώτοι κατευθυνόμενοι πύραυλοι που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια αυτού του πολέμου ήταν πύραυλοι «V-1» και «V-2». Ο «V-1» ήταν σαν ένα μικρό αεροσκάφος με αυτόματο πιλότο, του οποίου οι μηχανές έσβηναν , όταν έφθανε στον προορισμό του, και αυτός έπεφτε και εξερήγγυτο.

Ο «V-2» λειτουργούσε στη βάση μιας αρχής εντελώς διαφορετικής. Απογειωνόταν κάθετα. Η προωθητική μηχανή του απέδιδε την ισχύ της πολύ γρήγορα και προώθησε με μεγάλη ταχύτητα τον πύραυλο προς την υψηλή ατμόσφαιρα και το διάστημα. Στο σημείο αυτό έσβηναν οι μηχανές και η δύναμη της βαρύτητας της γης ήλκε τον πύραυλο προς την επιφάνεια της.

Ο πύραυλος ακολουθούσε λοιπόν μία τροχιά παραβολική που του επέτρεπε να καλύψει μία αρκετά μεγάλη απόσταση , από την Ολλανδία μέχρι το Λονδίνο, για παράδειγμα ο «V-2» λειτουργούσε στη βάση των αρχών της βαλλιστικής, σαν ένα βλήμα πυροβολικού. Ο «V-1» πετώντας στην ατμόσφαιρα ήταν ο πρώτος πύραυλος κρουαζιέρας, ενώ ο «V-2» ήταν ο πρώτος βαλλιστικός πύραυλος. Είναι οι προπομποί των δύο σημερινών κατηγοριών πυραύλων.

Έτσι ο πύραυλος «V-2» ήταν ο πρώτος πύραυλος που πέταξε στο διάστημα και κατασκευάστηκε στη διάρκεια ενός πολέμου, με στόχο να υπηρετήσει τις ανάγκες του, δηλαδή καθαρά για στρατιωτικούς σκοπούς. Η χρήση του διαστήματος είναι απαραίτητη ειδικά για τους πυραύλους μεγάλου βεληνεκούς, όπως τους διηπειρωτικούς. Το βεληνεκές εξαρτάται από το μέγιστο ύψος που θα φθάσει ο πύραυλος, την ταχύτητα που έχει αποκτήσει στο σημείο αυτό λόγω της ισχύος εκτόξευσης και, λόγω ύψους και σε συνδυασμό και με την έλλειψη τριβής αέρα, από τη δύναμη της βαρύτητας της γης που θα ασκηθεί επάνω του. Η κατοχή βαλλιστικών πυραύλων μέσου και μεγάλου βεληνεκούς σημαίνει τη στρατιωτική ικανότητα της διεξαγωγής ενός πολέμου (συμβατικού η πυρηνικού) σε απόσταση και ταυτόχρονα ικανότητα εκτόξευσης αντικειμένων στο διάστημα.

Πέντε χώρες έχουν επισήμως διακηρύξει ότι κατέχουν βαλλιστικούς πυραύλους μέσου και μεγάλου βεληνεκούς, που εκτοξεύονται από την ξηρά ή από υποβρύχια στη θάλασσα. Σύμφωνα με εκτιμήσεις στο τέλος του ψυχρού πολέμου και πριν τις συνθήκες START I και II οι χώρες αυτές κατείχαν:

	ΗΠΑ *	ΕΣΣΔ *	ΚΙΝΑ	ΓΑΛΛΙΑ	Η.Β.	ΣΥΝΟΛΟ
Μεγάλου βελ.	1.000	1.398	20**			2418
Μέσου	108*	553	155	18		
Υποβρυχίων	640	940	26	96	64	1766
ΠΟΣΟΣΤΑ						
	ΗΠΑ	ΕΣΣΔ	ΗΠΑ/ΕΣΣΔ	ΚΙΝΑ	ΓΑΛΛΙΑ	Η.Β.
Μεγάλου βελ.	41,35%	57,81%	99,16%	0,82%		
Μέσου	12,94%	66,30%	79,24%	18,58%	2,15%	
Υποβρυχίων	36,24%	53,22%	89,46%	1,47%	5,43%	3,62%

Πίνακας 29: Πύραυλοι μέσου και μεγάλου βεληνεκούς

Ο πίνακας 30 καταδικνύει ότι οι ΗΠΑ και η ΕΣΣΔ κατείχαν το σύνολο σχεδόν των επιθετικών βαλιστικών πυραύλων. Οι δύο αυτές χώρες έχουν μία συντριπτική υπεροχή στον τομέα της ικανότητας εκτόξευσης στο διάστημα και στον τομέα της ασφάλειας γενικά. Εντούτοις αυτή η υπεροχή έχει αξία σχετική, καθώς η κατοχή ενός ως προς τις δύο μεγάλες σημαίνει ότι οι δύο υπερδυνάμεις πρέπει να λάβουν υπόψη τους την πυραυλική τους ισχύ. Διότι, αν η πυραυλική ισχύς συνδυασθεί με την κατοχή πυρηνικών όπλων τότε αυτές οι μικρές δυνάμεις μπορούν να αντιπαρατάξουν στους μεγάλους μία καθόλου ευκαταφρόνητη απειλή αντιποίνων.

ΗΠΑ *	ΕΣΣΔ **	ΚΙΝΑ +	ΓΑΛΛΙΑ +	Η.Β +
Atlas D	SS-6	CSS-3		
Atlas E	SS-7/1,2	CSS-4		
Atlas F	SS-8/1,2			
Titan I	SS-8/1,2,3			
Titan II	SS-10			
Midget man	SS-11/1,2,3			
Minuteman I	SS-13/1,2			
Minuteman II	SS-16			
M/man III-3 Mk 12	SS-17/1,2,3			
M/man III-3 Mk 12 A	SS-18/1,2,3,4			
MX	SS-19/1,2,3			
	SS-24			
	SS-25			
ΒΑΛΙΣΤΙΚΟΙ ΠΥΡΑΥΛΟΙ ΜΕΓΑΛΟΥ ΚΑΙ ΜΕΣΑΙΟΥ ΒΕΛΗΝΕΚΟΥΣ/ΥΠΟΒΡΙΧΙΑΚΟΙ				
Polaris A1	SS-N-5	CSS-N-3 M-20		Polaris A3
Polaris A2	SS-N-6/1,2,3	M-4A		Polaris A3-TK
Polaris A3	SS-N-8/1,2	M-4 mod		
Poseidon C3	SS-N-17			
Poseidon C4	SS-N-18/1,2,3			
Trident I (C4)	SS-N-20			
Trident II (D5)	SS-N-21			
	SS-N-23			
ΒΑΛΙΣΤΙΚΟΙ ΠΥΡΑΥΛΟΙ ΜΕΣΟΥ ΒΕΛΗΝΕΚΟΥΣ				
Thor	SS-3	CSS-1		SSBS S-2
Jupiter	SS-4	CSS-2		SSBS S-3
Pershing-2	SS-4			
	SS-14			
	SS-15			
	SS-20			

Πίνακας 30: Τύποι βαλιστικών πυραύλων που δοκιμάστηκαν ως το τέλος του ψυχρού πολέμου Βαλλιστικοί διηπειρωτικοί πύραυλοι

19.1.6 Αντιβαλλιστικοί/ αμυντικοί πύραυλοι

Μόνον οι ΗΠΑ και η ΕΣΣΔ ανέπτυξαν και έθεσαν σε επιχειρησιακή λειτουργία αμυντικούς πυραύλους. Σε περίπτωση επίθεσης με βαλλιστικούς πυραύλους οι πύραυλοι αυτοί επιδιώκουν με μικρές πυρηνικές εκρήξεις να καταστρέψουν τους επιτιθέμενους πυραύλους, λίγο πριν οι τελευταίοι εισέλθουν στην ατμόσφαιρα.

Οι ΗΠΑ έθεσαν σε λειτουργία το 1967 το σύστημα «Sentinel» με πυραύλους «Nike-Zeus» και το 1975 το σύστημα «Safeguard», που χρησιμοποιούσε πυραύλους «Sprit» και «Spartan». Στη διάρκεια του 1975 όμως κατήργησαν τα αντιβαλλιστικά τους συστήματα. Η Σοβιετική Ένωση τοποθέτησε γύρω από την πρωτεύουσά της το σύστημα «ABM-1 Gallosh». Το σύστημα «Gallosh» ήταν το μόνο σε επιχειρησιακή ετοιμότητα αντιβαλλιστικό σύστημα και αποτελείτο από 32 πυραύλους με ακτίνα δράσης ύψος 300 χλμ.

19.1.7 Στρατιωτικοί δορυφόροι

Οι στρατιωτικοί δορυφόροι κατατάσσονται σε διαφορετικές κατηγορίες: φωτογραφικής παρακολούθησης, ηλεκτρικής παρακολούθησης, ωκεάνιας παρακολούθησης, έγκαιρης προειδοποίησης, μετεωρολογίας, γεωδαισίας, πλοήγησης, αντιδορυφορικοί, και δορυφοφόροι βομβαρδισμού μερικής τροχιάς.

Στη βάση στατιστικών του SIPRI υπολογίζεται ότι μεταξύ 1958 και 1983 εκτοξεύτηκαν στο διάστημα 2.114 στρατιωτικοί δορυφόροι. Μεταξύ αυτών των δορυφόρων 674 και 1.414 εκτοξεύτηκαν αντίστοιχα από τις ΗΠΑ και την ΕΣΣΔ. Το σύνολο τους, 2.088 δορυφόροι, αντιστοιχεί στο 98,76% των στρατιωτικών δορυφόρων που εκτοξεύτηκαν. Αν συγκριθούν οι 2.114 στρατιωτικοί με τους 3.029 δορυφόρους όλων των τύπων, πολιτικούς και στρατιωτικούς, που εκτοξεύτηκαν, αντιπροσωπεύουν σχεδόν το 70%. Το ποσοστό των αμερικανικών και σοβιετικών στρατιωτικών δορυφόρων ανέρχεται στο 65,5% του συνόλου. Συνεπώς στον τομέα των στρατιωτικών δορυφόρων οι ΗΠΑ και η ΕΣΣΔ κατείχαν ουσιαστικά το μονοπώλιο.

19.1.8 Αντιδορυφορικά όπλα

Στον τομέα αυτών των όπλων οι δύο χώρες κατέχουν και πάλι το μονοπώλιο. Σύμφωνα με τις ΗΠΑ η ΕΣΣΔ ήταν ή μόνη χώρα που διέθετε ένα αντιδορυφορικό σύστημα σε επιχειρησιακή ετοιμότητα. Εντούτοις και οι δύο χώρες είχαν πραγματοποιήσει σειρές δοκιμών στα αντιδορυφορικά όπλα.

Οι ΗΠΑ πραγματοποίησαν μεταξύ 1958 και 1984 τριάντα τρεις δοκιμές. Η ΕΣΣΔ μεταξύ 1968 και 1982 πραγματοποίησε είκοσι δοκιμές και ολοκλήρωσε πρώτη το σύστημα της στη δεκαετία του 1970. Το αμερικάνικο σύστημα στηρίζεται στον συνδυασμό πυραύλου με αεροσκάφος. Συγκεκριμένα ένα πολεμικό «F-15» φέρει πύραυλο και, αφού ανέλθει στα υψηλά στρώματα της ατμόσφαιρας, τον εκτοξεύει κατά του δορυφόρου. Η λογική του σοβιετικού συστήματος στηρίζεται σε δορυφόρο, ο οποίος εκτοξεύεται στην ίδια τροχιά με τον δορυφόρο, ο οποίος επιδιώκεται να καταστραφεί-σκοπός που επιτυγχάνεται με την σύγκρουση των δύο.

19.1.9 Διαστημικά όπλα υψηλής ενέργειας

Το κενό του διαστήματος επιτρέπει τη διάδοση και την ελεγχόμενη χρήση ακτίνων λέιζερ και ακτίνων νετρονίων και θεωρητικά καθιστά δυνατή τη στρατιωτική τους χρήση στο διάστημα. Δύο κράτη διεξήγαγαν εντατικά έρευνες στον τομέα των διαστημικών όπλων κατευθυνόμενης ενέργειας οι ΗΠΑ και η ΕΣΣΔ.

Οι ΗΠΑ πραγματοποίησαν επισήμως αυτές τις έρευνες στα πλαίσια της «Στρατηγικής Αμυντικής Πρωτοβουλίας», γνωστής ως «Πόλεμος των άστρων», ενός προγράμματος έρευνας που εξήγγειλε ο πρόεδρος των ΗΠΑ Ρόναλντ Ρέικαν στις 23.3.1983.

Ο Ρέικαν κάλεσε τους επιστήμονες της χώρας του να εργαστούν, για να δημιουργήσουν ένα σύστημα άμυνας που χρησιμοποιώντας το διάστημα και τα νέα τεχνολογικά μέσα θα σταματούσε τους επερχόμενους εχθρικούς διηπειρωτικούς πυραύλους.

Παρόμοιες έρευνες έκαναν και οι Σοβιετικοί. Αυτοί όμως από την πλευρά τους επιχείρησαν να πείσουν τη διεθνή κοινή γνώμη ότι έκαναν απλά και μόνο «βασική» έρευνα. Εντούτοις οι σοβιετικές προσπάθειες ανάπτυξης αυτών των όπλων επιβεβαιώθηκαν και από φωτογραφίες δορυφόρων, μεταξύ αυτών και του γαλλικού δορυφόρου «Spot», τον Οκτώμβριο του 1987.

19.2. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΒΟΡΕΙΑΣ ΚΟΡΕΑΣ

19.2.1 ΤΙ ΘΑ ΓΙΝΕΙ ΣΤΟ ΚΟΣΜΟ ΑΝ Ο ΚΙΜ ΠΑΘΗΣΕΙ ΤΟ ΚΟΥΜΠΙ; ΥΠΑΡΧΕΙ ΣΤ' ΑΛΗΘΕΙΑ ΚΙΝΔΥΝΟΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗΣ? ΠΟΙΕΣ ΘΑ ΕΙΝΑΙ ΟΙ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ; ΤΙ ΚΡΥΒΕΙ Η ΕΠΟΜΕΝΗ ΜΕΡΑ;

Ο Καθηγητής Πυρηνικής Φυσικής Αθανάσιος Γεράνιος απαντά.

Μπορεί η Βόρεια Κορέα να εξελιχθεί σε μεγάλη απειλή για την παγκόσμια ειρήνη; Τι αλλάζει στη γεωπολιτική σκαριέρα; Το τελευταίο χρονικό διάστημα η ένταση ανάμεσα στη δύση και το κράτος της Πιονγκγιάνγκ κλιμακώνεται διαρκώς. Η ισχυρή πυρηνική δοκιμή της προηγούμενης Κυριακής αλλά και οι ανοιχτές απειλές του Κιμ Γιονγκ Ουν για έναν ενδεχόμενο πυρηνικό πόλεμο εντείνουν την παγκόσμια ανησυχία και καθιστούν τον κίνδυνο μιας «πυρηνικής αντιπαράθεσης» το βασικότερο ζήτημα της διεθνούς πολιτικής. Γι' αυτό ζητήσαμε τη βοήθεια του καθηγητή Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων του Πανεπιστημίου Αθηνών, Αθανάσιου Γεράνιου, ώστε να μας εξηγήσει τι ακριβώς αφορά ο πυρηνικός κίνδυνος σήμερα, τις συνέπειες και τι κρύβει η επόμενη μέρα.

19.2.2 ΟΙ ΠΥΡΗΝΙΚΟΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΣΗΜΕΡΑ

Σήμερα, πολλά κράτη έχουν αποκτήσει πυρηνικά όπλα ,και μάλιστα χωρίς να έχουν υπογράψει το Σύμφωνο Μη Πυρηνικής Ανάπτυξης (Ινδίες, Πακιστάν, Β. Κορέα, Ισραήλ). Το γεγονός αυτό οδηγεί σε διασπορά των πυρηνικών όπλων, άρα σε μεγαλύτερη πιθανότητα χρήσης τους. Η πιθανότητα αυτή αυξάνεται περισσότερο όταν κάποιο πυρηνικό κράτος προκαλεί με δοκιμές πυραύλων που μπορούν να μεταφέρουν πυρηνικές κεφαλές.

Το επιστημονικό περιοδικό «Bulletin of the atomic scientists» στο εξώφυλλο κάθε τεύχους του απεικονίζει ένα ρολόι οι δείκτες του οποίου δείχνουν την ώρα λίγο πριν από τα μεσάνυχτα. Αυτή συμβολίζει το κατά πόσο πλησιάζουμε η απομακρυνόμαστε από έναν πυρηνικό πόλεμο (00:00), ανάλογα με τις σχέσεις των πυρηνικών κρατών μεταξύ τους και την παγκόσμια πυρηνική ισορροπία. Σήμερα, οι δείκτες είναι δύομισι λεπτά πριν από τα μεσάνυχτα. Από το 1947, μόνο μια φορά, το 1953, οι δείκτες ήταν πιο κοντά στις (00:00). Το ρολόι τότε έδειχνε δύο λεπτά πριν από τα μεσάνυχτα.

19.2.3 Η ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΗ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ

Οι πυρηνικές κεφαλές έχουν εξελιχθεί τόσο ώστε η εκρηκτική ισχύς να είναι χίλιες φορές μεγαλύτερη από την ισχύ της βόμβας στη Χιροσίμα (ουρανίου, 15 ktTNT) και στο Ναγκασάκι (πλουτωνίου, 19 ktTNT). Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στη σύντηξη ελαφρών πυρήνων, σε αντίθεση με τις παλιές βόμβες, που λειτουργούν με την σχάση βαρέων πυρήνων. Έτσι, η καταστροφή που προκαλείται είναι πολύ μεγαλύτερη και η ραδιενέργεια πολύ περισσότερη απ' ό,τι αυτή που εκλύεται από την βόμβα σχάσης. Είναι γνωστό το αποτέλεσμα στον ανθρώπινο πληθυσμό των ιαπωνικών πολέων (150.000 νεκροί επιτόπου και τουλάχιστον άλλοι τόσοι από την ραδιενέργεια). Ένας διηπειρωτικός πύραυλος (εμβέλειας 10.000 χιλιομέτρων) μπορεί να μεταφέρει δέκα πυρηνικές κεφαλές σύντηξης και να τις εκτοξεύει σε ανεξάρτητους στόχους. Το αποτέλεσμα της καταστροφής, αν οι κεφαλές αυτές καλύψουν μια πόλη εκατομμυρίων κατοίκων, θα είναι ο πλήρης αφανισμός πληθυσμού και κτιρίων.

Και αυτό είναι μόνο η αρχή, γιατί η αντίπαλη πλευρά, έστω με μια καθυστέρηση, θα απαντήσει ανάλογα. Αν αναλογιστούμε ότι το αποτέλεσμα αυτό προκαλείται μόνο με δύο διηπειρωτικούς πυραύλους πολλαπλών πυρηνικών κεφαλών και το σημερινό παγκόσμιο πυρηνικό οπλοστάσιο ως προς αυτό τον τύπο πυραύλου ξεπερνά τους χίλιους, μπορούμε να καταλάβουμε το μέγεθος του κινδύνου.

19.2.4 ΟΙ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΕΝΟΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ ΠΟΛΕΜΟΥ

Η μεταβολή στο κλίμα της γης, η δραματική μείωση της θερμοκρασίας και η επιρροή στο οξυγόνο, στο όζον, στα φυτά και στην τροφική αλυσίδα. Αναφερόμαστε στον λεγόμενο «πυρηνικό χειμώνα». Στην περίπτωση εκτεταμένου πυρηνικού πολέμου στο πολλαπλών εκρήξεων το σύννεφο της σκόνης που θα σηκωθεί από την επιφάνεια του εδάφους θα εμποδίζει τις ηλιακές ακτίνες να φτάνουν στη γη. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να προκληθεί συσκότιση και πτώση της μέσης θερμοκρασίας κατά περίπου 30K. Άρα, ό,τι έχει μείνει από την πυρηνική καταστροφή και δεν έχει επηρεαστεί από την ραδιενέργεια (μονοκυτταρικοί οργανισμοί), χωρίς θερμότητα και φως θα εξαφανίζεται προοδευτικά, π.χ. καλλιέργειες, δέντρα και φυτά. Αυτή η διαδικασία με την επικράτηση παγετώνων επί περίπου επτά μήνες υπολογίζεται να διαρκέσει έναν χρόνο.

Για να εξασφαλίσει την επιβίωση την επιβίωση της σε περίπτωση πυρηνικής επίθεσης, η Βόρεια Κορέα κατασκεύασε τους σταθμούς του μετρό σε σημαντικό βάθος. Έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν ως καταφύγια σε περίπτωση πολέμου. Μάλιστα, έχουν φτιαχτεί μεγάλες ατσαλένιες πόρτες για να εμποδίσουν την είσοδο της ακτινοβολίας στους χώρους προστασίας.

19.2.5 ΑΠΕΙΛΗΤΙΚΑ ΤΑ ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΟΠΛΑ ΤΗΣ ΒΟΡΕΙΑΣ ΚΟΡΕΑΣ?

Με τη βοήθεια της πρώην Σοβιετικής Ένωσης, από το 1950 η Β. Κορέα κατόρθωσε να αποκτήσει μέσα σε 30 χρόνια την πυρηνική πρώτη ύλη. Και αυτό έγινε χάρη στη λειτουργία του πυρηνικού σταθμού στη Γιονγκμπιόν, με την ανάκτηση πλουτωνίου ως υποπροϊόντος, σε ποσότητα αρκετή για την κατασκευή μιας πυρηνικής βόμβας.

Η εντύπωση πως τα πυρηνικά καταφύγια μπορούν να θωρακίσουν από την ραδιενέργεια και να σώσουν ζωές είναι απατηλή και παραπλανητική. Απατηλή, γιατί δεν μπορεί να παραμείνει κανείς πάνω από έναν μήνα κλεισμένος σε ένα καταφύγιο και κάποτε θα πρέπει να βγει στην επιφάνεια, μέσα σε μια ατμόσφαιρα έρημη, γεμάτη από αόρατη ραδιενέργεια, έχοντας κερδίσει έναν μήνα έρημης ζωής. Παραπλανητική, γιατί αμβλύνονται τα κίνητρα για έναν πυρηνικό αφοπλισμό, αφού πιστεύει κανείς ότι θα επιζήσει σε μια πυρηνική καταστροφή. Η Β. Κορέα παρουσιάζει τα πυρηνικά της όπλα ως πολύ ανώτερα απ' ό,τι υπολογίζεται από τα δεδομένα που συγκεντρώνουν οι κατασκοπευτικοί δορυφόροι των ΗΠΑ και τα δεδομένα των σεισμικών μετρήσεων που προκαλούνται από τις πυρηνικές δοκιμές της.

Για παράδειγμα, τον Απρίλιο του 2012 ανακοινώθηκε από τη Β. Κορέα μια δοκιμή ενός διηπειρωτικού πυραύλου. Όμως από Δυτικούς αναλυτές αποδειχθεί ότι αυτός δεν ήταν τίποτε άλλο από μια ψεύτικη απομίμηση πραγματικού διηπειρωτικού πυραύλου. Στις 23 Απριλίου του 2016 η Β. Κορέα ανακοίνωσε την εκτόξευση πυραύλου από υποβρύχιο, ο οποίος όμως δεν διένυσε ούτε 30 χιλιόμετρα. Τον Αύγουστο του 2016 δοκιμάστηκε από την Β. Κορέα τύπου Radong, ο οποίος ανακοινώθηκε ότι διένυσε απόσταση 1.200 χιλιομέτρων. Αυτό όμως έπεσε 250 περίπου χιλιόμετρα δυτικά από τα διεθνή ύδατα της Ιαπωνίας, στη χερσόνησο Oga, προκαλώντας τις έντονες διαμαρτυρίες της Ιαπωνίας για παραβίαση της ασφάλειας της (Choe Sang - Hun, 2 August 2016, «North Korea fires ballistic missile intomatersoff japan», «New York Times», Retrieved 4 August 2016).

Τα σημεία εκτόξευσης των πυραύλων αναγνωρίζονται από την υπέρυθη ακτινοβολία που εκπέμπουν κατά την εκτόξευση και κατά τη διαδρομή τους στην ατμόσφαιρα για να πέσουν κάπου στην θάλασσα. Άρα είναι γνωστή η εμβέλειά τους. Η ηγεσία της Β. Κορέας αποφεύγει συστηματικά να αναφερθεί στην ακρίβεια που έχουν οι πυραύλοι της και το γεγονός ότι διαβεβαιώνει πως έπεσαν στη θάλασσα της Ιαπωνίας δεν αποδεικνύει την ακρίβειά τους. Για παράδειγμα, υπάρχουν πυραύλοι με σφάλμα 49 μέτρα και άλλοι με 400. Και είναι σημαντικό στοιχείο η ευστοχία ενός πυραύλου, αν πρόκειται να χτυπήσει υπόγειο στόχο με μίνι πυρηνικά.

Θεωρώ ότι οι περίπου δέκα πυρηνικές κεφαλές που διαθέτει η Β. Κορέα, μαζί με τους πυραύλους που ίσως θα μπορούσαν να τις μεταφέρουν με επιτυχία, αποτελούν σίγουρα μια πυρηνική απειλή. Και δεν θα σταθώ στην προκλητική ρητορική της Β. Κορέας αλλά στα προκλητικά γεγονότα. Ούτε την περίοδο του Ψυχρού Πολέμου δεν είχαμε τέτοιες προκλητικές πτήσεις σοβιετικών ή αμερικάνικων πυραύλων πάνω από άλλα κράτη.

19.2.6 Η ΙΣΧΥΣ ΤΩΝ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ

Το 2016 η Β. Κορέα δημιούργησε έναν πολύ εντυπωσιακό διηπειρωτικό βαλλιστικό πύραυλο, τον Kwangmyongsong, που φημολογείται ότι μπορεί να καταστρέψει όλο το Λος Άντζελες. Το να δημιουργήσει κανείς έναν διηπειρωτικό πύραυλο δεν λέει τίποτα αν δεν υπάρχουν συγκεκριμένα στοιχεία. Δηλαδή, να έχει δοκιμαστεί πολλές φορές στην εμβέλεια

των 10.000 χιλιομέτρων(περίπου η απόσταση από το Λος Άντζελες), να έχει προσδιοριστεί η ακρίβεια του και να έχει δοκιμαστεί πολλές φορές η πυρηνική κεφαλή που θα μεταφέρει. Ούτε το πρώτο ούτε το δεύτερο έχουν γίνει. Δεν έχει ανιχνευτεί μέχρι σήμερα δοκιμή βορειοκορεατικού πυραύλου εμβέλειας 10.000 χιλιομέτρων. Και κυρίως δεν έχει καταγραφεί δοκιμή πυρηνικής κεφαλής ισχύος μεγατόνων. Επομένως οι περίπου δέκα πυρηνικές κεφαλές που κατέχει είναι τύπου ουρανίου ή πλουτωνίου με ισχύ 15 με 20 κιλοτόνους TNT, δηλαδή του τύπου Χιροσίμας και Ναγκασάκι.

19.3. ΟΙ ΣΥΜΑΝΤΙΚΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΑ ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΟΠΛΑ

Ένα πυρηνικό όπλο, σε αντίθεση με ένα ραδιενεργό, χαρακτηρίζεται από το ωστικό, θερμικό και ραδιενεργό κύμα. Μια βόμβα σύντηξης ισχύος μεγατόνων TNT προκαλεί ένα ωστικό κύμα που καταστρέφει όλα τα κτίρια σε απόσταση μέχρι και 50 χιλιομέτρων περίπου. Το θερμικό προκαλεί εγκαύματα 3^{ου} βαθμού σε απόσταση μέχρι και 100 χιλιομέτρων. Το δε ραδιενεργό κύμα μπορεί να προκαλέσει τον άμεσο ή τον αργό θάνατο εκατομμυρίων ανθρώπων. Μεταξύ τους τα πυρηνικά όπλα διακρίνονται σε αυτά που χρησιμοποιούν ως φορέα πυραύλους εκτοξευόμενους από την επιφάνεια της γης, από υπόγεια σιλό, από υποβρύχια, από πλοία επιφάνειας και αεροσκάφη. Η πυρηνική κεφαλή μπορεί να είναι σχάσης(χαμηλής σχετικά ισχύος) ή σύντηξης (χίλιες φορές ισχυρότερη, μεγατόνων).

19.4. ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ,ΜΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ «BOMBA»

Ένας πυρηνικός αντιδραστήρας καταναλώνει ουράνιο για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Το ουράνιο εκλύει μικρή σχετικά ποσότητα ραδιενέργειας πριν χρησιμοποιηθεί και μπορεί κανείς να το πλησιάσει χωρίς πρόβλημα. Όταν όμως χρησιμοποιηθεί, οι σχάσεις που έχουν πραγματοποιηθεί για να παραχθεί η απαιτούμενη θερμότητα έχουν δημιουργήσει νέα ραδιενεργά στοιχεία που ακτινοβολούν πολύ πιο έντονα από το αρχικό ουράνιο. Όταν το καύσιμο καταναλωθεί, γίνεται πυρηνικό απόβλητο του οποίου η ακτινοβολία προκαλεί θάνατο μέσα σε μια εβδομάδα. Το πρόβλημα λοιπόν είναι η επεξεργασία, η μεταφορά και η φύλαξη τους για μια διάρκεια αρκετών χιλιάδων χρόνων, δηλαδή για όσο θα ακτινοβολούν.

Το σημαντικότερο είναι ότι κάθε αντιδραστήρας έχει όριο λειτουργίας τα 30-40 χρόνια, γιατί μετά γίνεται έντονα ραδιενεργός και επικίνδυνος για το προσωπικό. Έτσι, πρέπει να σταματήσει τη λειτουργία του, να κλείσει, να διαλυθεί και να γίνει ο ίδιος πυρηνικό απόβλητο. Σήμερα, από τους περίπου 420 πυρηνικούς αντιδραστήρες, οι μισοί και πλέον έχουν γεράσει. Ήδη πάνω από 50 έχουν σταματήσει τη λειτουργία τους η έχουν γίνει πυρηνικά απόβλητα. Σε περίπου δέκα χρόνια όλοι οι υπόλοιποι αντιδραστήρες θα πρέπει να γίνουν πυρηνικά απόβλητα. Δηλαδή, ενώ αρχικά έχουμε 400 πυρηνικούς αντιδραστήρες, τελικά έχουμε τα πυρηνικά απόβλητα που παρήγαν όλα αυτά τα χρόνια, συν τους ίδιους αντιδραστήρες.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Έχοντας πλέον φτάσει στο τέλος της πτυχιακής μας εργασίας συμπεραίνουμε ότι η πυρηνική επιστήμη είναι μια από τις πιο πολλά υποσχόμενες αλλά και αμφιλεγόμενες επιστήμες τόσο για ιατρική χρήση όσο και για στρατιωτική χρήση, διότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για ειρηνικούς σκοπούς αλλά και για στρατιωτικούς.

Όλα ξεκίνησαν από την δομή της ύλης, η ύλη αποτελείται από άτομα, το άτομο είναι το μικρότερο κομμάτι ύλης που μπορεί να διακριθεί με χημικές μεθόδους. Ο πυρήνας ενός ατόμου συνίσταται από στοιχειώδη σωματίδια τα πρωτόνια και τα νετρόνια που μαζί ονομάζονται νουκλεόνια. Τα πρωτόνια είναι σωματίδια φορτισμένα θετικά ενώ τα νετρόνια είναι σωματίδια ηλεκτρικά ουδέτερα. Οι δυνάμεις που εξασκούνται μέσα στον πυρήνα του ατόμου μεταξύ των σωματιδίων και είναι υπεύθυνες για την συγκρότησή του είναι οι πυρηνικές δυνάμεις. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά αυτών είναι το ότι είναι ισχυρές, είναι κορέσιμες, είναι μικρής εμβέλειας και είναι ανεξάρτητες του φορτίου. Μέσω της αυθόρμητης και τυχαίας διάσπασης, των ραδιενεργών πυρήνων έχουμε την ταυτόχρονη εκπομπή ραδιενεργών ακτινοβολιών. Οι πιο συνηθισμένες ακτινοβολίες είναι η ακτινοβολία α , η ακτινοβολία β και η ακτινοβολία γ . Τα ραδιενεργά στοιχεία χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Τα φυσικά ραδιενεργά που απαντώνται στη φύση όπως τα ισότοπα του ουρανίου (U-238, U-235), του θορίου (Th-232) και Τα τεχνητά ραδιενεργά τα οποία είναι κατασκευάσματα του ανθρώπου και παράγονται κατά το βομβαρδισμό των στοιχείων με σωματίια, όπως τα πρωτόνια, τα σωματίια άλφα, τα νετρόνια.

Το ουράνιο είναι ένα φυσικό ραδιενεργό στοιχείο με (χημικό σύμβολο U) το οποίο στην καθαρή του μορφή έχει αργυρό χρώμα και είναι ένα βαρύ μέταλλο. Το ουράνιο απαντάται σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις (ίχνη) στα πετρώματα και το έδαφος, στο νερό και τον αέρα και σε όλα τα υλικά που αποτελούνται από φυσικά στοιχεία. Με σκοπό την παραγωγή πυρηνικού καυσίμου για συγκεκριμένους τύπους αντιδραστήρων και πυρηνικών όπλων, το φυσικό ουράνιο πρέπει να εμπλουτιστεί στο ισότοπο U-235, το οποίο χρησιμοποιείται για την πυρηνική σχάση αυτό το παραπροϊόν είναι γνωστό ως απεμπλουτισμένο ουράνιο. Το απεμπλουτισμένο ουράνιο είναι σημαντικά λιγότερο ραδιενεργό από το φυσικό ουράνιο. Το ουράνιο είναι ένα από τα πιο ελκυστικά στοιχεία για στρατιωτική χρήση λόγω των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του και χρησιμοποιείται κυρίως για την κατασκευή βλημάτων.

Κάθε άνθρωπος καταπίνει ή εισπνέει κάθε μέρα μικρές ποσότητες φυσικού ουρανίου από μελέτες που έχουν γίνει σε ανθρώπους που έχουν εκτεθεί σε ουράνιο ή απεμπλουτισμένο ουράνιο έχει διαπιστωθεί ότι όταν εισπνέεται ή καταπίνεται σε σημαντικές ποσότητες μπορεί να προκαλεί βλάβες στην ανθρώπινη υγεία λόγω της χημικής τοξικότητάς του και σε ακραίες περιπτώσεις να καταστρέψουν πλήρως τη λειτουργία των νεφρών επίσης η έκθεση σε ακτινοβολία που εκπέμπεται από φυσικό ή απεμπλουτισμένο ουράνιο εγκυμονεί κινδύνους ανάπτυξης καρκίνου ωστόσο έχουμε επιδράσεις ακόμη και στο αναπαραγωγικό σύστημα καθώς και στην ανάπτυξη του ανθρώπινου εμβρύου.

Οι επιδράσεις του απεμπλουτισμένου ουρανίου στο περιβάλλον εξαρτώνται από τις ειδικές συνθήκες όπου έγινε χρήση βλημάτων απεμπλουτισμένου ουρανίου και από τα φυσικά, χημικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος. Με την πάροδο του χρόνου οι συγκεντρώσεις απεμπλουτισμένου ουρανίου στην επιφάνεια του εδάφους

μειώνονται λόγω του ανέμου και της βροχής που μεταφέρουν το απεμπλουτισμένο ουράνιο μακρύτερα ή το ξεπλένουν στο έδαφος

Για την ανίχνευση πυρηνικών ακτινοβολιών έχουμε τους εξής Ανιχνευτές: Geiger-Muller, Απαριθμητής Σπινθηρισμών, Απαριθμητές Ge, Ge-Li και Si-Li, Πλαστικοί ανιχνευτές ιχθών, Απαριθμητές θερμοφωταύγειας, Απαριθμητής νετρονίων BF₃ καθώς και φορητά όργανα ανίχνευσης πυρηνικών ακτινοβολιών επίσης προσδιορισμό ραδιενεργών συγκεντρώσεων και ενεργοτήτων με τη μέθοδο των «καθυστερημένων» νετρονίων, ορυκτά με τη μέθοδο εγγραφής ιχθών σχάσης καθώς και μέθοδο ανάλυσης φθορισμού με ακτίνες-X.

Άλλη μια εφαρμογή της ραδιενεργού διάσπασης είναι αυτή της ραδιοχρονολογήσεις που ήρθε να βοηθήσει στα όσα γεωλογικά προβλήματα προσδένοντας με μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις μας. Οι μέθοδοι των ραδιοχρονολογήσεων ταξινομούνται ως εξής α) Μέθοδοι ζευγών β) Μέθοδος μεμονωμένων ισοτόπων γ) Φυσικές μέθοδοι που δεν στηρίζονται καθαυτές στο φαινόμενο της ραδιενεργού διάσπασης. Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί μια νέα μέθοδος χρονολόγησης που στηρίζεται στο φαινόμενο του συντονισμού του σπιν του ηλεκτρονίου. Επίσης έχουμε εφαρμογές των ραδιοϊσοτόπων στη γεωλογία για την ανεύρεση μεταλλευμάτων και ορυκτών

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της εποχής μας είναι αυτό της διαχείρισης των ραδιενεργών καταλοίπων. Ραδιενεργά κατάλοιπα θεωρούνται τα υλικά που περιέχουν αξιόλογη ποσότητα ραδιενεργών ισοτόπων, έχουν προκύψει από χρήση ραδιενεργών υλικών και μετά από αυτήν τη χρήση δεν θεωρούνται πλέον χρήσιμα. Διακρίνονται σε χαμηλού επιπέδου, ενδιάμεσου επιπέδου και υψηλού επιπέδου κατάλοιπα, με κριτήρια την ποσότητα και το είδος της ραδιενέργειας, καθώς και τους αναμενόμενους χρόνους επιβίωσης των ραδιενεργών ισοτόπων που περιέχουν. Έχουμε την βραχυπρόθεσμη και μεσοπρόθεσμη διαχείριση των πυρηνικών καταλοίπων. Έχουν επικρατήσει οι εξής δύο πολιτικές διαχείρισης α) Ανακύκλωση του χρησιμοποιημένου καυσίμου για τον διαχωρισμό του ουρανίου και του πλουτωνίου από τα «λοιπά ραδιενεργά υλικά». β) Αντιμετώπιση του συνόλου της χρησιμοποιημένης συστάδας καυσίμου ως καταλοίπου

Το M1A1 είναι ένα από τα καλύτερα θωρακισμένα άρματα στον κόσμο με Chobham και πλακίδια ERA στα πλάγια στο οποίο Υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης πλακών απεμπλουτισμένου ουρανίου (Depleted Uranium – DU). Φυσικά το πυροβόλο του M1A1 είναι ένα σύγχρονο M256 των 120 χιλ. που προέρχεται από το L/44 της Rheimentall του Leopard-2. Το ΣΕΠ, τα σκοπευτικά και οι διόπτρες του M1A1 είναι από τα πιο σύγχρονα. Η εκσυγχρονισμένη έκδοση M1A2 SEP (Systems Enhancement Package) περιέχει βελτιώσεις στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό του και τα σκοπευτικά.

Ένα άλλο επίκαιρο θέμα είναι αυτό της στρατιωτικής αποτροπής, η οποία χρησιμοποιείται για πολεμικούς σκοπούς όπως στην περίπτωση της Βόρειας Κορέας που δείχνει δυνατή και έτοιμη για έναν ενδεχόμενο Πυρηνικό Πόλεμο, γεγονός που θέτει σε κίνδυνο όχι μόνο το περιβάλλον αλλά και ολόκληρη την ανθρώπινη ύπαρξη. Ωστόσο, στόχος είναι να χρησιμοποιηθεί για ειρηνικούς σκοπούς χωρίς να βλάπτει κάθε ζωντανό οργανισμό στην γη.

Τέλος στις μέρες μας ο ρόλος της Πυρηνικής Ιατρικής η οποία είναι μια πολλά υποσχόμενη νέα σχετικά ειδικότητα που έχει σαν σκοπό την εφαρμογή των ιδιοτήτων των ραδιοϊσοτόπων στη διάγνωση και την θεραπεία των ανθρώπινων ασθενειών και μελετά την ασταθή ισότοπα σε συνδυασμό με την ανάπτυξη των συστημάτων ανίχνευσης της εκπεμπόμενης από ραδιοϊσότοπα ακτινοβολίας. Οι ιατρικές εξετάσεις οι οποίες γίνονται στην Πυρηνική Ιατρική είναι γνωστές ως σπινθηρογραφήματα. Ο κλάδος αυτός της ιατρικής ενσωματώνει βασικές γνώσεις και από άλλες επιστήμες όπως τη φυσική, τη χημεία, την ραδιοχημεία, ραδιοφάρμακα και ραδιοϊσότοπα, ενώ παρουσιάζονται τα μηχανήματα που αποτελούν βασικό κορμό της Πυρηνικής Ιατρικής, όπως είναι η γ-camera, ο κρύσταλλος, οι

φωτοπολλαπλασιαστές, τα μηχανήματα PET και SPECT που θα τα δούμε αναλυτικά το καθένα στο συγκεκριμένο κεφάλαιο.

Θα σας παροτρύνουμε αν συνεχίσετε αυτό το θέμα της Πτυχιακής μας να χρησιμοποιήσετε αυτές τις κατηγορίες που αναφέραμε παραπάνω.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abdoli M, Dierckx RAJO, Zaidi H, Metal artifact reduction strategies for improved attenuation correction in hybrid PET/CT imaging. *Med Phys* 2012; 39(6): 3343-60.
- Altman DG, Bland JM. Diagnostic test 1: sensitivity and specificity. *BMJ* 1994; 308:1552.
- Altman DG, Bland JM. Diagnostic tests 2: predictive values. *BMJ* 1994; 309:102.
- Bland JM, Altman DG. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet* 1986; i: 307-10.
- Απόστολος Πολυζάκης, Σταθμοί Παραγωγής Ηλεκτρικής Ισχύος , Εκδόσεις Power Heat Cool,Πτολεμαΐδα
- Αντωνόπουλος Ντόμης Μιχάλης, Εισαγωγή στην Πυρηνική Τεχνολογία, Έκδοση Ζήτη 2018, Θεσσαλονίκη.
- Belhocine T, Rachinsky I, Akincioglu C et al, How Useful is an integrated SPECT/CT in Clinical Setting and Research?:Evaluation of a Low Radiation Dose 4 Slice System. *The Open Medical Imaging Journal* 2008; 2 : 80-108.
- Bezrukov I, Mantlik F. MR-Based PET Attenuation Correction for PET/MR Imaging. *SeminNucl Med* 2013; 43:45-59.
- Blezek D, Yang X, Erickson BJ. Image Postprocessing and Volume Rendering. [online] *Society for imaging Informatics in Medicine*, 2009. Available from: doi:10.1007/978-1-4419-0485-0_8.
- Bruyant PP, Analytic and Iterative Reconstruction Algorithms in SPECT. *J Nucl Med* 2002;43: 1343-58.
- Buck AK, Nekolla S, Ziegler S et al. SPECT/CT. *J Nucl Med* 2008; 49(8): 1305-19.
- Catana C, Wu, Y, JudenhoferMs et al. Simultaneous Acquisition of Multislice PET and MR Images: Initial Results with a MR-Compatible PET Scanner. *J Nucl Med* 2006 ; 47(12):1968-76.
- Connor MK, Kemp BJ. Single-Photon Emission Computed Tomography/Computed Tomography: Basic Instrumentation and Innovations. *Semin Nucl Med* 2006;36:258-266.
- Cherry SR. Multimodality Imaging: Beyond PET/CT and SPECT/CT. *Semin Nucl Med* 2009; 39: 348-53.
- Cherry SR, Sorenson JA, Phelps ME. *Physics in Nuclear Medicine*, 3rd edn. Philadelphia, Saunders 2003.
- Cleophas TJ, Zwinderman AH. *SPSS for Starters*. Berlin, Springer 2010.
- Γραμματικός Φίλιππος Κ., Κλινική και Εργαστηριακή Πυρηνική Ιατρική σε 20 ειδικότητες , Αφοί Κυριακίδη Εκδόσεις Α.Ε.
- Di Carli MF, Hachamovitch R. New Technology for Noninvasive Evaluation of Coronary Artery Disease. *Cirtulation* 2007; 115: 1464-80.
- Εφημερίδα Lifo Συγγραφέας Γιάννης Πανταζόπουλος (7-13 Σεπτεμβρίου 2017 σελ.(9-10) , Τι θα γίνει αν ο Κιμ πατήσει το κουμπί, απαντά ο καθηγητής Πυρηνικής Φυσικής Αθανάσιος Γεράνιος
- Ghazanfari N Sarkar S, Loudos G, Ay MR. Quantitative assessment of crystal material and size on the performance of rotating dual head small animal PET scanners using Monte Carlo modeling. *Hell J Nucl Med* 2012; 15(1):33-9.
- Ghosh P. SPECT/CT-Hype or necessity; A comprehensive review of current clinical applications, brochure, Siemens Medical Solutions USA, 2009.

- Gerber SB, Voelkl Finn K. Using SPSS for Windows. Data Analysis and Graphics, 2nd edn. Berlin, Springer, 2005.
- Kalantari F, Rajabi H, Saghari M, Quantification and reduction of attenuation related artifacts in SPET by applying attenuation model during iterative image reconstruction: A Monte Carlo study. *Hell j Nucl Med* 2011; 14(3):278-83.
- Knoll GF. Radiation detection and measurement, 2nd edn. New York, John Wiley & Sons, 1989.
- Κουσκουβέλης Ηλίας Ι. (2000) Θεωρία Διεθνών σχέσεων στον ψυχρό πόλεμο-Αποτροπή και πυρηνική στρατηγική Αθήνα: Εκδόσεις Ποιότητα (σελ. 47-66
- Lee JS. Technical Advances in Current PET and Hybrid Imaging Systems. *The Open Nuclear Medicine journal* 2010; 2: 192-208.
- Lee JS. Basic Nuclear Physics and Instrumentation. In: Kim EE, Lee DS, Tateishi U, Baum R (Eds). *Handbook of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, principles and clinical applications*. 2012: pp.3-19. Singapore, World Scientific Publishing Co.
- Leech NL, Barrett KC, Morgan GA. SPSS for Intermediate Statistics Use and Interpretation, 2nd edn. New York, Lawrence Erlbaum Associates 2005.
- Marques de Sa JP. Applied Statistics using SPSS, Statistica, Matlab and R. Berlin, Springer 2007.
- Μικρό βιογραφικό για το στοιχείο ουράνιο. Κάθε Κυριακή «Το Βήμα» μάς ξεναγεί και μια άλλη γωνιά του περιοδικού πίνακα.
- Noe DA. The logic of laboratory medicine, 2nd edn. (<http://users.rcn.com/dennisano>) Free e-book.
- Patton JA. History and Principles of Hybrid Imaging. In: Delbeke D, Israel O (Eds). *Hybrid PET/CT and SPECT/CT Imaging*. [online] Springer Science+Business Media 2010; LLC: 3-33. Available from: doi: 10.1007/978-0-387-92820-3_1.
- Ratib O. PET/CT Image Navigation and Communication. *J Nucl Med* 2004; 45(1):6S-55S.
- Ratib O PET/MRI: A new era in multimodality molecular imaging. *Clin Transl imaging* [online] 2013. Available from: doi:10.1007/s40336-013-0003-5.
- Razifar P, Sandstrom M, Schnieder H et al. Noise correlation in PET, CT, SPECT and PET/CT data evaluate during autocorrelation function: a phantom study on data, reconstructed using FBP and OSEM. *BMC Medical Imaging* 2005; 5:5.
- Rischpler C, Nekolla SG, Dregely I, Schwaiger M. Hybrid PET/MR Imaging of the Heart: Potential, Initial Experiences, and Future Prospects *J Nucl Med* 2013; 54 (3): 402-15.
- Ritt P, Kuwert T. Quantitative SPECT/CT. In: Schober O, Riemann B (Eds). *Molecular Imaging in Oncology. Recent Results in Cancer Research* 187. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013: 313-30. Available from doi: 10.1007/978-3-642-10853-2_10.
- Cantone MC, Hoeschen C. The Role of Radiation Physics in Nuclear Medicine. In: Cantone MC, Hoeschen C (Eds) *Radiation Physics for Nuclear Medicine*. [online] Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2011: pp. 3-5. Available from: doi: 10.1007/978-3-642-11327-71.
- Saha GB. Interaction of Radiation with Matter. In: *Physics and Radiobiology of Nuclear Medicine*. [Online] New York, Springer Science+Business Media New York 2013: pp.63-77. Available from : doi: 10.1007/978-1-4614-4012-36.
- Rzeszotarski MS. The AAPM/RSNA physics tutorial for residents. *Counting Statistics. Radiographics* 1999;19:765-82.
- Sardanelli F, Di Leo G. *Biostatistics for Radiologists. Planning. Performing and Writing a Radiologic Study*. Milan, Springer-Verlag Italia 2009.
- Zanzonico P. Instrumentation. In: Strauss HW et al. (Eds) *Nuclear Oncology . Pathophysiology and Clinical Applications*. [online] New York, Springer Science+

Business Media New York 2013: pp. 93-120. Available from: doi:10.1007/978-0-387-48894-35

Ζησιμόπουλος Σ. Αθανάσιος Πυρηνικός Ιατρός Κλινικές Εφαρμογές Πυρηνικής Ιατρικής (σελ.1-17) Ιατρικές Εκδόσεις Π.Χ Πασχαλίδης

<http://ebooks.edu.gr/modules/e-book/show.php/DSGL111/769/5029,22988/>

ΠΚΔ/ΧΣ C:\Documents and Settings\USER\My Documents\DEPLETED URANIUM\Depleted Uranium.doc 25/8/2006

<http://collinsj.tripod.com/protect.htm> ,<http://www.fprado.com/armorsite/abrams.htm>