

ΡΑΔΙΟΒΙΟΛΟΓΙΑ

Ακτινοβολίες και Ζωή

ΛΟΥΚΑ Χ. ΜΑΡΓΑΡΙΤΗ

ΒΙΟΛΟΓΙΚΟ ΤΜΗΜΑ

ΠΑΝ/ΜΙΟΥ ΑΘΗΝΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΒΙΟΧΗΜΕΙΑΣ ΚΥΤΤΑΡΙΚΗΣ-
ΜΟΡΙΑΚΗΣ ΒΙΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΝΕΤΙΚΗΣ

1 9 9 6

ΡΑΔΙΟΒΙΟΛΟΓΙΑ

Ακτινοβολίες και Ζωή

ΛΟΥΚΑ Χ. ΜΑΡΓΑΡΙΤΗ

ΒΙΟΛΟΓΙΚΟ ΤΜΗΜΑ

ΠΑΝ/ΜΙΟΥ ΑΘΗΝΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΒΙΟΧΗΜΕΙΑΣ ΚΥΤΤΑΡΙΚΗΣ-
ΜΟΡΙΑΚΗΣ ΒΙΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΝΕΤΙΚΗΣ

1996

Το έργο αυτό αφιερώνεται στη
μνήμη του πρώτου διδάξαντα τη
Ραδιοβιολογία στην Ελλάδα, αεί-
μνηστου Καθηγητή της Βιολο-
γίας

Γεωργίου Π. Πανταζή



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	σελ.
Πρόλογος.....	9
Κεφ. 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
1.1. ΓΕΝΙΚΑ.....	11
1.2. ΤΟ ΑΤΟΜΟ ΚΑΙ ΤΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΤΟΥ	16
Κεφ. 2: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΙΟΝΙΖΟΥΣΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ	
2.1. ΤΡΟΠΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΕΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	21
2.1.1. Ενέργεια και ένταση δέσμης ακτινοβολίας.....	26
2.1.2. Ραδιοϊσότοπα	28
2.1.3. Κοσμική ακτινοβολία	30
2.2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΚΑΙ ΦΩΤΟΝΙΩΝ	
2.2.1. Ακτίνες-Χ και γ.....	32
2.2.2. Σωματίδια-α	37
2.2.3. Σωματίδια-β	37
2.2.4. Πρωτόνια (p).....	38
2.2.5. Νετρόνια (n).....	38
2.2.6. Βαριά ιόντα	39
2.3. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	41
2.3.1. Γραμμική μεταβίβαση ενέργειας – ειδικός ιονισμός.....	41
2.3.2. Ειδικός ιονισμός για τις ακτίνες-Χ και γ.....	46
2.3.3. Διεγέρσεις που προκαλούνται από ιονίζουσες ακτινοβολίες	47
2.3.4. Αντιδράσεις ιόντων	47
2.3.5. Ανίχνευση ελευθέρων ριζών.....	49
2.4. ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΤΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ, ΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗΣ ΔΟΣΗΣ	51
2.4.1. Ποσότητα ραδιενέργειας (Curie και Becquerel).....	52
2.4.2. Μονάδα έκθεσης στην ακτινοβολία (Roentgen)	54
2.4.3. Μονάδα απορρόφησης (rad και Gray)	55
2.4.4. Μονάδα ισοδύναμης δόσης (rem, Sievert).....	56
2.5. ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΙΟΝΙΖΟΥΣΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	60
2.5.1. Θάλαμος ιονισμού	61
2.5.2. Ο μετρητής Geiger-Müller.....	61
2.5.3. Μετρητής με σπινθηρισμό (scintillation counter)	65

2.5.4.	Αυτοραδιογραφικές μέθοδοι	70
2.5.5.	Ραδιοασσολογικές μέθοδοι.....	72
2.6.	ΕΠΙΠΕΔΑ ΦΥΣΙΚΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ – ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΕΣ ΔΟΣΕΙΣ.....	74
Κεφ. 3: ΤΡΟΠΟΣ ΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΙΟΝΙΖΟΥΣΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ ΣΤΑ ΚΥΤΤΑΡΑ		
3.1.	ΑΜΕΣΗ ΚΑΙ ΕΜΜΕΣΗ ΔΡΑΣΗ	81
3.1.1.	Μέθοδοι διάκρισης της άμεσης και έμμεσης δράσης	83
3.1.2.	Διάκριση με αραίωση	83
3.1.3.	Διάκριση με χημική προστασία	84
3.1.4.	Διάκριση με πήξη	85
3.2.	ΣΧΕΣΗ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΗ ΔΟΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΑΡΗΡΟΥΜΕΝΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ	
3.2.1.	Θεωρία του στόχου	85
3.3.	ΣΧΕΤΙΚΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΑΜΕΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΜΜΕΣΗΣ ΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ	87
3.4.	ΔΡΑΣΗ ΕΛΕΥΘΕΡΩΝ ΡΙΖΩΝ	90
3.4.1.	Ραδιόλυση του νερού.....	90
3.4.2.	Αντιδράσεις των ελευθέρων ριζών του νερού με ανόργανα και οργανικά μόρια.....	93
3.4.3.	Επίδραση των ακτινοβολιών στα υδροκολλοειδή	95
3.5.	ΡΑΔΙΟΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ – Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΟΞΥΓΟΝΟΥ	96
3.6.	ΕΠΑΝΟΡΘΩΤΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ – ΡΑΔΙΟΕΥΑΙΣΘΗΤΟΠΟΙΗΤΕΣ	96
Κεφ. 4: ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ ΑΠΟ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΚΤΙΝΩΝ-Χ		
4.1.	ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΥΠΟΚΥΤΤΑΡΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ	
4.1.1.	Άμεση δράση των ακτινοβολιών επί των μακρομορίων.....	97
4.1.2.	Έμμεση δράση των ακτινοβολιών επί των μακρομορίων	98
4.1.3.	Ραδιοευαισθησία κυτταρικών συστατικών	99
4.2.	ΡΑΔΙΟΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΤΩΝ ΧΡΩΜΟΣΩΜΑΤΩΝ	103
4.3.	ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΚΥΤΤΑΡΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ	108
4.3.1.	Καμπύλες επιβίωσης	108
4.3.2.	Κυτταρικός μετασχηματισμός	110
4.4.	ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΕ ΙΣΤΟΥΣ.....	111
4.5.	ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΕ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥΣ.....	112
4.6.	ΕΠΑΝΟΡΘΩΤΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ	118
4.7.	ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΤΡΟΠΟΠΟΙΟΥΝ ΤΗΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ ΑΠΕΝΑΝΤΙ ΣΤΗΝ ΙΟΝΙΖΟΥΣΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	119
4.8.	ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΟΥ ΤΡΟΠΟΠΟΙΟΥΝ ΤΗ ΡΑΔΙΟΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΤΩΝ ΙΣΤΩΝ	120
4.9.	ΟΞΕΙΑ ΚΑΙ ΧΡΟΝΙΑ ΑΚΤΙΝΟΠΑΘΕΙΑ	121
4.9.1.	Φαινόμενο οξείας ακτινοπάθειας.....	121

4.9.2. Φαινόμενο χρόνιας ακτινοπάθειας	123
4.10. ΡΑΔΙΟΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΟΜΑΔΩΝ ΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ ΦΥΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΖΩΙΚΩΝ	123
4.11. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΤΡΟΦΙΚΗΣ ΑΛΥΣΙΔΑΣ	124
4.12. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΑ ΦΥΤΑ	125
4.13. ΡΑΔΙΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ	125
4.14. ΡΑΔΙΟΟΙΚΟΛΟΓΙΑ	126
Κεφ. 5: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΙΟΝΙΖΟΥΣΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ	
5.1. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΑΚΤΙΝΩΝ-Χ	128
5.2. ΙΧΝΗΘΕΤΕΣ – ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΑ ΙΣΟΤΟΠΑ	133
5.2.1. Παρασκευή ραδιοϊσοτόπων	135
5.2.2. Φυσικές ιδιότητες ραδιενεργών στοιχείων και ισοτόπων	136
5.2.3. Βιοϊατρικές εφαρμογές Ραδιοϊσοτόπων	142
5.2.4. Χειρισμός και φύλαξη ραδιοϊσοτόπων	150
5.3. ΡΑΔΙΟΘΕΡΑΠΕΙΑ	153
5.4. ΑΤΟΜΙΚΑ ΟΠΛΑ – ΠΥΡΗΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ	156
5.5. ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ	160
5.5.1. Τι ακολουθεί μετά από ένα πυρηνικό ατύχημα;	160
5.5.2. Πυρηνικά ατυχήματα	163
5.6. ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ ΑΠΟ ΙΟΝΙΖΟΥΣΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΖΩΗΣ	171
ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ	177

ΑΝΤΙ ΠΡΟΛΟΓΟΥ

Η **Βιοφυσική επιστήμη** είναι ένας πολύ μεγάλος κλάδος της σύγχρονης Βιολογίας και ασχολείται κυρίως με:

α) τη διερεύνηση βιολογικών φαινομένων που διέπονται από νόμους της Φυσικής (π.χ. φωτοσύνθεση, όραση, ακοή, νευρικός παλμός, κ.λ.π.).

β) τη χρησιμοποίηση φυσικών μεθόδων για τη διαλεύκανση της μοριακής δομής και λειτουργίας της ζωντανής ύλης (π.χ. περιθλαση ακτίνων-Χ, φασματοσκοπία Raman, κ.λ.π.).

γ) την επίδραση εξωτερικών φυσικών παραγόντων (θερμοκρασία, πίεση, ακτινοβολία) στη λειτουργικότητα κυττάρων και οργανισμών.

Στην τελευταία αυτή ενότητα ανήκει και η «**ΡΑΔΙΟΒΙΟΛΟΓΙΑ**»*, δηλ. το περιεχόμενο του εγχειριδίου αυτού που εστιάζεται περισσότερο στην επίδραση των **ιονίζουσών ακτινοβολιών** δηλ. εκείνων που προκαλούν ιονισμούς στα άτομα και μόρια και που έχουν ενέργειες φωτονίων μεγαλύτερες από 12,4 eV ή μήκος κύματος μικρότερο από 1.000 Å και συχνότητα μεγαλύτερη από 3.000.000 GHz (δηλ. $3 \cdot 10^{15}$ c/s-κύκλους ανά δευτερόλεπτο!).

Η ζωντανή ύλη αναπτύσσεται και πολλαπλασιάζεται κάτω από την επίδραση ακτινοβολίας που προέρχεται από φυσικές ή τεχνητές πηγές. Η ακτινοβολία αποτελεί άλλοτε βασικό συντελεστή ύπαρξης (φωτοσύνθεση), άλλοτε βοηθητικό παράγοντα για ανάπτυξη και επιβίωση (φωτοτακτισμός, φωτοπεριοδικότητα, βιοφωτισμός) και άλλοτε καταστρεπτική επίδραση (φωτοδυναμική δράση, δυσμενείς μεταλλαγές, εγκαύματα, οξεία και χρόνια ραδιονόσηση, θάνατος).

Η κατανόηση των μηχανισμών που παίρνουν μέρος στις παραπάνω διεργασίες έχει αναμφίβολα ξεχωριστή θέση στη σύγχρονη βιολογική έρευνα. Ακόμα θα πρέπει να αναφέρουμε πως η τεκμηρίωση του τρόπου δράσης, ιδιαίτερα των ιονίζουσών ακτινοβολιών, στα βιολογικά συστήματα αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη σωστή χρησιμοποίησή τους σε θεραπευτικούς σκοπούς. Είναι βέβαια αυτονόητο πως αν και ο άνθρωπος δεν διαθέτει κατάλληλα αισθητήρια για την αντίληψη των ακτινοβολιών αυτών, αυτό δε σημαίνει ότι είναι αβλαβείς. Ακόμα και οι ακτινοβολίες από ραδιοφωνικούς σταθμούς, συσκευές Radar για να μην

* Ο όρος «Ραδιοβιολογία» αποτελεί μεταφορά στην Ελληνική του όρου «Radiobiology», ο οποίος προέρχεται από συγχώνευση του «Radiation Biology» (κατά παράφραση = Βιολογικές επιδράσεις των ακτινοβολιών). Συνεπώς ο όρος Radiobiology θα μπορούσε να αποδοθεί και σαν «Ακτινοβιολογία».

αναφέρουμε βέβαια τις ακτίνες-Χ από ακτινογραφίες, είναι γνωστό πως σε δόσεις πάνω από κάποια χαμηλή τιμή, προκαλούν βλάβες στα βιολογικά μόρια και κατ' επέκταση στους ζωντανούς οργανισμούς. Στο σημείο αυτό είναι αναγκαίο να σημειωθεί ότι **«από Βιολογικής άποψης ασφαλής δόση ακτινοβολίας είναι η μη-δενική δόση»**. Στον κανόνα αυτό βέβαια δεν εμπίπτουν οι ακτινοβολίες που προκαλούν χρήσιμα ερεθίσματα (π.χ. οπτικό ή ακουστικό ερέθισμα) αφού σ' αυτές είναι αναγκαία κάποια δόση για να δημιουργηθεί το ερέθισμα.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν γίνεται προσπάθεια να δοθούν οι **Φυσικές** και οι **Βιολογικές** διαστάσεις των ηλεκτρομαγνητικών αλλά και των «σωματιδιακών» ακτινοβολιών δηλ. οι τρόποι παραγωγής τους, οι τρόποι δράσης τους, οι μονάδες μέτρησης των δόσεων, καθώς και οι επιπτώσεις τους στη ζωντανή ύλη από το μικρομοριακό μέχρι το πληθυσμιακό επίπεδο. Ακολουθεί κεφάλαιο εφαρμογών όπως είναι η Ακτινοδιαγνωστική και Ραδιοθεραπεία με ακτίνες-Χ ή με Ραδιοϊσότοπα, αλλά επίσης γίνεται αναφορά στις επιπτώσεις από διαρροή ραδιενέργειας από πυρηνικά εργοστάσια και από πυρηνικές δοκιμές, ενώ τέλος επιχειρείται συμπερασματική αποτίμηση της θέσης των ιονιζουσών ακτινοβολιών στην ποιότητα ζωής του σύγχρονου ανθρώπου.

Κύριο έναυσμα της συγγραφής των κεφαλαίων αυτών αποτέλεσαν τα **«Μαθήματα Ραδιοβιολογίας»** του αείμνηστου Καθηγητή Γ. Πανταζή, ενώ η προσπάθεια για ολοκληρωμένη παρουσίαση των πληροφοριών που περιέχονται δεν θα ήταν δυνατή χωρίς τη συμβολή πολλών συναδέλφων, συνεργατών και φίλων, τους οποίους ευχαριστώ και από τη θέση αυτή: Δρ. Ε. Σιόρη, Δρ. Χ. Σάββα-Δημοπούλου, Δρ. Π. Κρητίδη, Δ. Περισιάνου, κ.ά.

Λουκάς Χ. Μαργαρίτης
Ιούλιος 1987

Κεφάλαιο 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Μολονότι στη φυσιολογική τους επίδραση οι ιονίζουσες ακτινοβολίες δεν θεωρούνται σαν απαραίτητες για την εν γένει διατήρηση της ζωής, όπως αυτό συμβαίνει για τις μη ιονίζουσες ακτινοβολίες (Φωτοσύνθεση, Φωτοπεριοδικότητα, Φωτοτακτισμός, Βιοφωτισμός κ.ά.), αν και σίγουρα έχουν επηρεάσει (θετικά;) την εξέλιξη της ζωής, εν τούτοις έχουν τύχει ιδιαίτερης προσοχής και μελέτης για τους εξής λόγους:

α) η ανακάλυψη της πρώτης ιονίζουσας ακτινοβολίας από τον Roentgen και στη συνέχεια από τον Becquerel και το ζεύγος Curie, άνοιξε νέους ορίζοντες στις θετικές επιστήμες.

β) αμέσως μετά την ανακάλυψή τους έγιναν φανερές οι βλαβερές επιπτώσεις αλλά και οι χρήσιμες εφαρμογές τους.

γ) η χρήση της Πυρηνικής ενέργειας σε πολεμικές επιχειρήσεις (βόμβες Hiroshima και Nagasaki) αλλά και σε ειρηνικές εφαρμογές (π.χ. πυρηνικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας) όπου έχουν συμβεί ατυχήματα επηρεάζουν μακροπρόθεσμα τη ζωή στον πλανήτη μας.

δ) τόσο η κοσμική ακτινοβολία όσο και η Φυσική ακτινοβόληση των κατοίκων της Γης από ραδιενεργά ορυκτά φτάνουν αρκετές φορές σε υψηλά επίπεδα.

ε) η χρησιμοποίηση των ιονίζουσών ακτινοβολιών σαν μέσα διάγνωσης αλλά και θεραπείας προϋποθέτει γνώση της επίδρασής τους στα κύτταρα.

στ) η επίδραση τυχούσας ιονίζουσας ακτινοβολίας πάνω σ' ένα Βιολογικό σύστημα επιφέρει ανιχνεύσιμες αλλοιώσεις η διερεύνηση των οποίων μας δίνει έμμεσα πληροφορίες της λειτουργίας κυτταρικών συστατικών.

Η μόνη ένδειξη περί συμμετοχής ιονίζουσας ακτινοβολίας στη διατήρηση της ζωής, αναφέρεται στην πιθανότητα εμπλοκής της κοσμικής ακτινοβολίας πάνω στο μηχανισμό Βιολογικού ωρολογίου των οργανισμών. Τούτο όμως αποτελεί ακόμη μιά απλή ένδειξη.

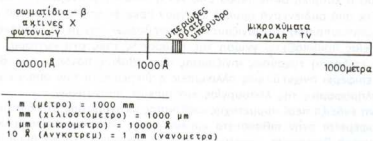
Η ύπαρξη ακτινοβολιών είναι τόσο παλαιά όσο και το ίδιο το Σύμπαν, αφού δεν είναι δυνατόν να φανταστεί κανείς αλληλομετατροπές ενέργειας (κινητική, θερμική πυρηνική, κ.ά.) χωρίς την ταυτόχρονη ελευθέρωση κάποιας ακτινοβολίας του όλου ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που πάντα υπήρχε. Έτσι δεν είναι τυ-

χαίο το γεγονός ότι οι οργανισμοί «δημιουργήθηκαν» και αναπτύχθηκαν μέσα σε καταγιοσμό ακτινοβολιών όπως περιγράφουν και οι αντίστοιχες θεωρίες για την προέλευση της ζωής. Ο πρώτος άνθρωπος δεν γνώριζε παρά μόνο την ακτινοβολία που μπορούσε να δει με τα μάτια του, η οποία και αποτελεί ένα ελάχιστο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που προερχόταν από την ίδια τη Γη, αλλά και από το διάστημα. Χρειάστηκε να περάσουν αρκετές δεκάδες χιλιάδες χρόνια για να γίνει αντιληπτό, μέσα από τη συνεχή προσπάθεια για μάθηση, του πρωτόγονου ανθρώπου, πως υπάρχουν και «αόρατες δυνάμεις» που επηρεάζουν τη ζωή στον πλανήτη μας.

Η ανάλυση του λευκού φωτός που προέρχεται από τον Ήλιο πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Newton (1666 μ.Χ.), ο οποίος αφού τοποθέτησε ένα πρίσμα στο δρόμο του λευκού φωτός παρατήρησε την ανάλυσή του σε ένα φάσμα που αρχίζει από το ερυθρό και τελειώνει στο ιώδες χρώμα. Αρκετά χρόνια αργότερα (1.800 μ.Χ.) ανακαλύφθηκε ότι και από τις δύο πλευρές της ορατής περιοχής του ηλιακού φάσματος υπάρχουν αόρατες ακτινοβολίες που γίνονται αντιληπτές έμμεσα: Η μεν υπέρυθρος ακτινοβολία με αύξηση της θερμοκρασίας ενός θερμομέτρου, η δε υπεριώδης, με επίδραση πάνω σε φωτογραφικές πλάκες.

Η ανακάλυψη βέβαια αυτής της ίδιας της ηλεκτομαγνητικής ακτινοβολίας και η δυνατότητα παραγωγής επιθυμητών ακτινοβολιών δεν είναι παρά επίτευγμα των τελευταίων 90 χρόνων που αποτελεί απειροελάχιστο κλάσμα της ιστορίας του ανθρώπου. Οι λόγοι της «καθυστέρησης» αυτής είναι πολλοί και διάφοροι αλλά ο κυριώτερος είναι πως η ανίχνευση αόρατων καταστάσεων απαιτεί πάντα ωριμότητα τεχνολογικής εξέλιξης και επιστημονικής σκέψης. Κατά συνέπεια όταν καλύφθηκε το «πλήρωμα του χρόνου» έφθασε η ιστορική αναγκασία στιγμή που με τη μορφή αξίων εκπροσώπων του ανθρώπινου είδους θεμελίωσε σταδιακά τις γνώσεις μας για τις ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες.

Σήμερα είναι γνωστό ότι «κυκλοφορούν» γύρω μας άπειρες τέτοιες ακτινοβολίες (βλ. εικ. 1, Πίν. Ι) που έχουν φυσική ή τεχνητή προέλευση. Πολλές από



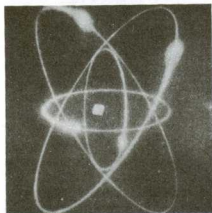
Εικ. 1: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα των φυσικών και τεχνητών ακτινοβολιών περιλαμβάνει την περιοχή του ορατού φωτός (4.000-7.000 Å) και χωρίζεται στις ακτινοβολίες που προκαλούν ιονισμό ατόμων (με μήκος κύματος μικρότερο από 1.000 Å) και στις ακτινοβολίες που προκαλούν μόνο διεγέρσεις, ταλαντώσεις και περιστροφές μορίων ή ατόμων (με μήκος κύματος μεγαλύτερο από 1.000 Å). Ο διαχωρισμός αυτός έχει δημιουργήσει δύο περιοχές Βιολογικής έρευνας, τη «Ραδιοβιολογία» και τη «Φωτοβιολογία» αντίστοιχα.

αυτές είναι αναγκαίες, ενώ άλλες δεν είναι αναγκαίες για τη διατήρηση της ζωής και όμως υπάρχουν χωρίς να μπορούμε να τις εξουδετερώσουμε. Όμως και στις δύο κατηγορίες ακτινοβολιών άλλες είναι ωφέλιμες και άλλες βλαβερές.

Πίνακας 1: Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Συχνότητα (Hz)	Μήκος κύματος λ	Όνομασία
$0-5,5 \times 10^5$	-550 m	Ακουστική συχνότητα, Υπέρηχοι
$0,65-1,6 \times 10^6$	200-550m	Μακρά κύματα Ραδιοφωνίας
$0,15-1,5 \times 10^7$	20-200 m	Μεσαία κύματα Ραδιοφωνίας
$0,15-6 \times 10^8$	0,5-20 m	Βραχεία κύματα Ραδιοφωνίας
$0,06-30 \times 10^{10}$	0,001-0,5 m	TV, VHF, UHF (Τηλεόραση, Υπερβραχεία κ.λπ.)
$0,15-26 \times 10^{11}$	0,1-20 mm	Μικροκύματα, Radar
$0,25-40 \times 10^{13}$	0,75-120 μm	Θερμική ακτινοβολία
$4-8 \times 10^{14}$	3,500-7,500 Å	IR εγγύς (υπέρυθρο)
$0,08-30 \times 10^{16}$	1-3.500 Å	Ορατό φως
$0,3-30 \times 10^{18}$	0,1-100Å	Υπεριώδες φως
$0,3-30 \times 10^{20}$	0,0001-0,1 Å	Ακτίνες-X (1-100 Kev)
$0,08-1 \times 10^{22}$	0,0003-1Å	Ακτίνες-γ (0,1-10 Mev)
		Ηλεκτρόνια ($50-3 \times 10^6$ ev)
		(Πρωτόνια, νετρόνια, σωματίδια -α, κ.λπ.)

Για να πάρουμε όμως τα πράγματα από την αρχή θα πρέπει να πούμε πως όλες οι ακτινοβολίες αποτελούν εκδήλωση κάποιων φαινομένων σε μόρια, σε άτομα (εικ. 2) ή σε υποατομικά συστατικά.



Εικ. 2: Σχηματική απεικόνιση ατόμου Βηρυλλίου με 4 πρωτόνια και 2 νετρόνια στον πυρήνα, ενώ γύρω περιστρέφονται σε καθορισμένες τροχιές τέσσερα ηλεκτρόνια. Αν οι αναλογίες ήταν σωστές τότε ο πυρήνας στο κέντρο δεν θα φαινόταν με γυμνό μάτι.



Εικ. 3: Δημόκριτος ο Αβδηρίτης. Έλληνας φιλόσοφος του 4ου αιώνα π.Χ. Πρώτος συνέλαβε την ιδέα της ύπαρξης των **ατόμων** από τα οποία αποτελούνται όλα τα σώματα.

Η έννοια της ύπαρξης στοιχειωδών σωματιδίων – **ατόμων** – από τα οποία αποτελείται κάθε αντικείμενο, καλλιεργήθηκε πρώτα φιλοσοφικά (Βλ. Δημόκριτος-Έλληνας φιλόσοφος του 5ου αιώνα π.Χ. (εικ. 3)) και πολύ αργότερα πειραματικά από τον John Dalton (1.766-1.844).



Joseph-John Thomson

Η ανακάλυψη μιας αόρατης ακτινοβολίας έγινε από τον Γουλιέλμο Ραϊντγκεν (Wilhelm Roentgen (εικ. 4) στα 1895, όταν πειραματιζόμενος με λυχνία κενού Crookes και φθορίζουσα οθόνη παρατήρησε έκπληκτος τη «σκιά» του χεριού του να διαγράφεται στην οθόνη καθώς από μέσα του περνούσαν οι αόρατες ακτίνες που πήραν το όνομά του αλλά που από τον ίδιο μετριοφρόνα αλλά μεγάλο ερευνητή, ονομάστηκαν «ακτίνες X» Ένα χρόνο αργότερα, στα 1896, ανακαλύφθηκε το ηλεκτρόνιο από τον Ιωσήφ-Ιωάννη Τόμσον (Joseph-John Thomson) στην Αγγλία. Όπως σήμερα ξέρουμε, οι ακτίνες X δημιουργούνται όταν ηλεκτρόνια «προσκρούσουν» σε μέταλλο. Έτσι δεν είναι καθόλου τυχαίο που οι δύο αυτές ανακαλύψεις έγιναν σχεδόν ταυτόχρονα και άνοιξαν νέους ορίζοντες στη Φυσική, που αργότερα έδωσε τους κλάδους της **Κβαντομηχανικής**, της **Πυρηνικής Φυσικής**, της **Ηλεκτρονικής Οπτικής** και αρκετούς άλλους.

Η χρήσιμη αλλά παράλληλα και η βλαβερή δράση των ακτίνων Roentgen έγιναν αμέσως φανερές, πρώτα με τη δυνατότητα της διάγνωσης (ακτινογραφίες) που άρχισε αμέσως και έπειτα με την πρόκληση καρκίνων στους απλούς ανθρώ-



Εικ. 4. Ο Γερμανός Φυσικός Γουλιέλμος Ραϊντγκεν που ανακάλυψε τον τρόπο παραγωγής ακτίνων-X στα 1895.



Εικ. 5. Φωτογραφία της Μαρίας Κιουρί και της κόρης της Ειρήνης Κιουρί στο εργαστήριό τους όπου έγινε η ανακάλυψη και μελέτη των φαινομένων της ραδιενέργειας.

πους που κατασκεύαζαν και δοκίμαζαν τις λυχνίες ακτίνων Roentgen, αλλά και στους ερευνητές με πρώτο το Roentgen. Είναι λοιπόν κανόνας πως κάθε μεγάλη ανακάλυψη συνοδεύεται και από κινδύνους που παρανοούνται; Ίσως ναι.

Εκτός όμως από τις αόρατες αυτές ακτίνες που παράγονται τεχνητά ανακαλύφθηκαν λίγο αργότερα (1896) από τον Ερρίκο Μπεκερέλ (Henry Becquerel) και τη Μαρία Σκλοντόφσκα-Κιουρί (Marie Sklodowska-Curie) στη Γαλλία (εικ. 5) πως πετρώματα του ορυκτού ουρανίου έχουν και αυτά αόρατες ακτίνες πίο ισχυρές από τις ακτίνες Roentgen.

Έτσι ανακαλύφθηκαν τα στοιχεία ράδιο, θόριο, και πολώνιο.

Το τμήμα των ανακαλύψεων αυτών το πλήρωσε η Μαρία Κιουρί με τη ζωή της, αφού στο απόγειο της παγκόσμιας δόξας της αρρώστησε σοβαρά από καρκίνο (λευχαιμία)-τραγικό επακόλουθο εκδίκησης (!) από τις ακτίνες που η ίδια έφερε στο φως της Επιστήμης, εργαζόμενη σκληρά σε άθλιες συνθήκες μαζί με τον άντρα της Πέτρο Κιουρί (Pierre Curie) που χάθηκε πρόωρα από τροχαίο(!) ατύχημα στην καρδιά του Παρισιού. Όμως η Επιστήμη με τη μορφή πολλών αξίων ερευνητών πήρε τη σκυτάλη για να δώσει στις ακτίνες αυτές (ακτίνες γ, σωματίδια β, σωματίδια α) πρακτικές εφαρμογές που σήμερα είναι πολύ διαδεδομένες στη θεραπεία καρκίνων. Είναι γεγονός λοιπόν πως οι ακτίνες αυτές που σκοτώνουν μπορούν όταν ελέγχονται κατάλληλα να αποτελέσουν μέσο θεραπείας (ιδιαίτερα μετά την ανακάλυψη από τον Fermi στα 1934 του τρόπου παραγωγής ραδιοϊσοτόπων). Η χρησιμοποίηση όμως (εκμετάλλευση θα μπορούσαμε να πούμε) των μεγάλων ανακαλύψεων για πολεμικούς σκοπούς δεν μπορούσε παρά να γίνει και στην περίπτωση αυτή: έτσι είχαμε την τραγική ανάπτυξη των ατομικών βομβών και των άλλων πυρηνικών όπλων που απειλούν τη ζωή πάνω στον πλανήτη Γή. Παράλληλα, η ενέργεια των ακτίνων αυτών έχει χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε πολλές χώρες, αφού σήμερα υπάρχουν περισσότερα από 370 μεγάλα πυρηνικά εργοστάσια σ' όλο τον κόσμο. Η εξέλιξη αυτή βέβαια δεν θα ήταν καθόλου κατακριτέα (αφού τα εργοστάσια αυτά δίνουν φθηνότερα και καθαρότερα ηλεκτρική ενέργεια) αν οι κίνδυνοι που συνεπάγονται τη λειτουργία τους δεν είναι πράγματι ολέθριοι σε περιπτώσεις ατυχημάτων. Τα λίγα (ευτυχώς) ατυχήματα που έχουν συμβεί, με πρόσφατο εκείνο του Τσερνόμπιλ, έχουν αποδείξει ότι η τεχνολογία ίσως δεν είναι έτοιμη ακόμη να αξιοποιήσει ακίνδυνα την ενέργεια των ακτίνων αυτών για την παραγωγή άλλης μορφής ενέργειας, όπως είναι η ηλεκτρική.

Οι ιονίζουσες αυτές ακτινοβολίες (Roentgen, γ,β,α) έχουν όπως αναφέραμε βλαβερές επιδράσεις σε ανθρώπους και γενικά στη ζωντανή ύλη εξ' αιτίας της μεγάλης ενέργειας που έχουν, η οποία προκαλεί ιονισμούς και διασπάσεις των μορίων που συμμετέχουν στην εκδήλωση των φαινομένων της ζωής (αύξηση, ερεθιστικότητα, αναπαραγωγή). Έτσι από πολύ νωρίς, σχεδόν αμέσως μετά την ανακάλυψη των ακτίνων αυτών δημιουργήθηκαν οι επιστημονικοί κλάδοι της Ακτινοφυσικής (Radiation Physics) που αναφέρεται στις φυσικές ιδιότητες των ιονίζουσών ακτινοβολιών και της Ραδιοβιολογίας ή Ακτινοβιολογίας (Radiobiology ή Radiation Biology) που αναζητά τις σχέσεις ανάμεσα στις ιδιότητες των ιονίζουσών ακτινοβολιών και στις επιδράσεις τους στη ζωντανή ύλη, και που αποτε-



Ερρίκος Μπεκερέλ

λεί το κύριο αντικείμενο των «Σημειώσεων» αυτών. Πρόκειται πράγματι για σημειώσεις, αφού ένα τόσο τεράστιο θέμα δεν μπορεί ούτε καν περιληπτικά να αποδοθεί στις λίγες σελίδες που ακολουθούν, και που περιλαμβάνουν τις φυσικές ιδιότητες των ακτινοβολιών (δόσεις, όργανα μέτρησης, κ.λπ.), τα όρια δόσεων ασφαλείας για τον άνθρωπο, τις επιπτώσεις σε μόρια-κύτταρα-οργανισμούς, τους κινδύνους από πυρηνικά ατυχήματα και τέλος τη χρήση των ακτίνων αυτών στη διαγνωστική και στη θεραπεία διαφόρων ασθενειών.

Η ιστορική πορεία της ραγδαίας, μέσα σε 40-50 χρόνια ανακάλυψης της δομής του ατόμου, έχει ως εξής:

- 1895: «Παρατήρηση» των αόρατων από το ανθρώπινο μάτι *ακτίνων Χ* με πειράματα σε λυχνία Crookes, του Roentgen.
- 1896: Ανακάλυψη διεισδυτικών ακτινοβολιών που εκπέμπονται από ορυκτά ουρανίου, Becquerel και Curie.
- 1897: Ανακάλυψη των *ηλεκτρονίων* από τον Τόμσον, με πειράματα σε καθοδική λυχνία Crookes όπου η επιτάχυνση (προς το θετικό πόλο) αόρατων σωματιδίων δημιουργούσε φθορισμό.
- 1900: Πρώτες βιολογικές εφαρμογές ακτίνων Χ με πρόκληση μεταλλαγών από τον Muller.
- 1900-1905: Διατύπωση θεωρίας περί *φωτονίων* – στοιχειωδών ποσών ενέργειας κατά την εκπομπή ακτινοβολίας. Planck και Einstein.
- 1905: Διατύπωση της εξίσωσης $E = M \cdot c^2$ από τον Einstein που επιβεβαιώθηκε πειραματικά αργότερα, αφού όταν γίνεται εκπομπή π.χ. σωματιδίων $-β$ από ένα άτομο τότε η απώλεια μάζας ηρεμίας του ηλεκτρονίου και το ισοδύναμο μάζας της ενέργειας του κινούμενου ηλεκτρονίου είναι ίσα με την αρχική μάζα του ατόμου.
- 1911: Ανακάλυψη των *πρωτονίων* στον πυρήνα του ατόμου που περιέχουν θετικό φορτίο: πειράματα Rutherford με σκέδαση *σωματιδίων -α* σε λεπτό φύλλο χρυσού.
- 1919: Παραγωγή πρωτονίων με βομβαρδισμό ατόμων με σωματίδια $-α$ από τον Rutherford.
- 1923: Μέτρηση του φορτίου και της μάζας του ηλεκτρονίου από τον Robert Millikan.
- 1932: Ανακάλυψη του *νετρονίου* από τον Chadwick, μετά από βομβαρδισμό ατόμων βηρυλίου με σωματίδια- α .
- 1939: Σχάση (διάσπαση) ατόμου ουρανίου και ελευθέρωση ενέργειας.
- 1942: Κατασκευή πυρηνικού αντιδραστήρα (Η.Π.Α.)

1.2. Το άτομο και τα συστατικά του

Πρωτοπόρος στην κατανόηση της δομής των ατόμων αρκετούς αιώνες μετά τη σύλληψη της ιδέας περί Ατόμου από τον Δημόκριτο υπήρξε ο Νεοζηλανδός Ερνέστος Ράδερφορντ που εργαζόμενος στην Αγγλία παρατήρησε πως οι αόρα-



ΑΛΒΕΡΤΟΣ ΑΙΝΣΤΑΙΝ

τες ακτίνες απο ορυκτό ουράνιο (πισουρανίτη) έχουν διάφορες ιδιότητες και ονόμασε «άλφα» (α) αυτές που αποκλίνουν στον αρνητικό πόλο ηλεκτρικού πεδίου και «βήτα» (β) αυτές που αποκλίνουν προς τον θετικό πόλο (αργότερα βρέθηκε ότι ταυτίζονται με τα ηλεκτρόνια). Υπάρχει όμως και μια τρίτη κατηγορία ακτίνων που δεν επηρεάζεται από ηλεκτρικό ή μαγνητικό πεδίο: οι ακτίνες αυτές ονομάστηκαν «γάμμα» (γ) από τον Paul Villard που τις ανακάλυψε.

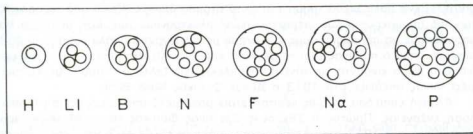
Στα 1907 ο Ράδερφορντ άρχισε να συνεργάζεται με τον Hans Geiger (Γερμανό Φυσικό) σε θέματα ανίχνευσης της ακτινοβολίας: κατασκεύασαν τον πρώτο «μετρητή ραδιενέργειας με σπινθηρισμό», όπου μια επίστρωση θείουχου ψευδαργύρου εξέπεμπε φως (σπινθηρισμό) όταν προσβαλόταν από σωματίδια α .

Ο Ράδερφορντ επίσης στα 1918 με μια σειρά ευφυών πειραμάτων έδειξε ότι ο πυρήνας του ατόμου αποτελείται από πρωτόνια που έχουν θετικό φορτίο που εξουδετερώνεται από ισάριθμα ηλεκτρόνια περιστρεφόμενα γύρω από τον πυρήνα.

Σήμερα είναι γνωστό ότι εκτός από τα πρωτόνια (που καθορίζουν και τη χημική συμπεριφορά κάθε ατόμου), ο πυρήνας περιέχει νετρόνια που απλώς «βαρύνουν» χωρίς να έχουν φορτίο. Τα διάφορα στοιχεία διαφέρουν μεταξύ τους τουλάχιστον ως προς τον αριθμό πρωτονίων (εικ. 6).



Ερνέστος Ράδερφορντ.



Εικ. 6: Άτομα που δείχνουν τις διαφορές τους στον αριθμό πρωτονίων του πυρήνα. (Κάθε πρωτόνιο αποτελείται από 3 «κουάρκς».)

Συμπληρωματικά πειράματα των ίδιων ερευνητών εδραίωσαν την αντίληψή τους για τη δομή του ατόμου που συμπληρώθηκαν από πρωτοποριακές έρευνες του Δανού Niels Bohr και του Αυστριακού Wolfgang Pauli. Δεν άργησε όμως να αποκαλυφθεί από τον Albert Einstein και άλλους ερευνητές πως στον Ατομικό και υπο-Ατομικό κόσμο η έννοια της *ύλης* είναι συνδεδεμένη με την έννοιά της *ενέργειας* ($E=M \cdot c^2$), η οποία και μεταδίδεται σε στοιχειώδη ποσά, τα *quanta* (φωτόνια). Έτσι, ένα ατομικό σωματίδιο μπορεί να μετατραπεί σε φωτόνιο και αντίστροφα. Οι κυματικές ιδιότητες των στοιχειωδών σωματιδίων (ηλεκτρονίου, πρωτονίου, νετρονίου) έγιναν φανερές, ιδιαίτερα μετά τις θεωρητικές προσεγγίσεις του Γάλλου Louis De Broglie, του Αυστριακού Erwin Schrodinger (ιδρυτού της Κυματομηχανικής) και του Γερμανού Werner Heisenberg (ιδρυτού της Κβαν-



Νίλς Μπορ

τομηχανικής). Απεδείχθη ότι κάθε κινούμενο σωματίδιο ισοδυναμεί με «υλικό κύμα» μήκους κύματος $\lambda = h/m \cdot v$ αφού π.χ. τα ηλεκτρόνια δημιουργούν φαινόμενα περίθλασης όπως τα φωτόνια-Χ.

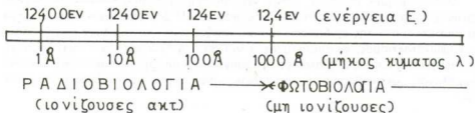
Στο άτομο του υδρογόνου (διαμέτρου $\sim 1 \text{ \AA}$) με ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο, εάν μεγενθύνουμε τον πυρήνα (με το πρωτόνιο) στις διαστάσεις μιας μπάλας του τένις, τότε το ηλεκτρόνιο με μέγεθος κεφαλής καρφίτσας κάνει περί τις εκατό χιλιάδες δισεκατομμύρια περιστροφές στο δευτερόλεπτο (!) με ακτίνα ενός χιλιομέτρου (!).

Είναι ενδιαφέρων στο σημείο αυτό ο υπολογισμός της διαμέτρου της Γης όπως θα γινόταν αν παρέμενε μόνο η μάζα των πυρήνων των ατόμων: 640 m (!) (με στοιχεία: διάμετρος πυρήνα ατόμων = $3,5 \cdot 10^{-4} \text{ \AA}$, διάμετρος ατόμων = $3,5 \text{ \AA}$ και διάμετρος Γης $12.740.000 \text{ m}$). Είναι βέβαια δύσκολο να φανταστούμε την εκδήλωση των φυσικών, χημικών και βιολογικών φαινομένων σε μια τέτοια περίπτωση, αφού η μεγάλη πυκνότητα της ύλης (200 εκατομμύρια τόνοι/ cm^3) δεν θα μπορούσε να ευνοήσει καμία φυσική, χημική ή βιολογική διαδικασία.

Μετά τα κλασσικά πειράματα του Rutherford και των μαθητών του, Geiger και Marsden στις αρχές του αιώνα (απόκλιση σωματιδίων α από λεπτό φύλλο μετάλλου) η αντίληψη για τη δομή του ατόμου άλλαξε ριζικά: αποδείχθηκε ότι ο πυρήνας με τα πρωτόνια και τα νετρόνια, συγκεντρωμένος περίπου στο κέντρο αποτελεί ένα πολύ μικρό τμήμα του όλου ατόμου όπως ορίζεται από τις τροχιές των πύο απομακρυσμένων (περιφερειακών) ηλεκτρονίων του. Κατ' αναλογία θα μπορούσαμε να παρομοιάσουμε ένα άτομο με μια γιγάντια μπάλα διαμέτρου 200 μέτρων, όπου ο πυρήνας έχει το μέγεθος καρδιού (!) στο κέντρο της. Στον ενδιάμεσο χώρο κινούνται με «άνεση» τα ηλεκτρόνια (αλλά σε καθορισμένες τροχιές), όπως απέδειξε στα 1913 ο Δανός Φυσικός Niels Bohr.

Αλλαγή επιπέδου τροχιάς «επιτρέπεται» μόνο μετά από απορρόφηση ή απόδοση ενέργειας. Πρώτος ο 26 χρονος Βρετανός Φυσικός Henry Moseley (που σκοτώθηκε στα 1913 στον 1 ο παγκόσμιο πόλεμο) έδειξε ότι ο ατομικός αριθμός κάθε στοιχείου (όπως προσδιορίζεται στον Πίνακα του Mendeleev) είναι ταυτόσημος με τον αριθμό των ηλεκτρονίων του. Δώδεκα χρόνια αργότερα ο Αυστριακός Wolfgang Pauli διατύπωσε τη γνωστή θεωρία του πως ο αριθμός των ηλεκτρονίων σε κάθε στιβάδα είναι καθορισμένος.

Καταλήγοντας, στη σύντομη αυτή Εισαγωγή θα πρέπει να σταθούμε στο σημαντικότερο ίσως σημείο της μελέτης των ακτινοβολιών που είναι ο διαχωρισμός τους σε *ιονίζουσες* και σε *μη ιονίζουσες* (Εικ. 7) ανάλογα με την ενέργεια που μεταφέρουν. Βλέπουμε συνεπώς πως προϊόντα των ατόμων επηρεάζουν αυτά τα ίδια τα άτομα. Δεν θα ήταν ίσως υπερβολή να πούμε πως το άτομο είναι η αρχή της εκδήλωσης όλων των φαινομένων που συμβαίνουν στο Σύμπαν, τόσο του υλικού κόσμου, όσο και του *Βιολογικού*. Όπως δεν μπορεί να υπάρξει κοινωνία με τις διάφορες εκδηλώσεις της (πολιτιστικές, πολιτικές, κ.λπ.) χωρίς την ύπαρξη του ατόμου-ανθρώπου, έτσι δεν μπορούν να υπάρξουν τα φαινόμενα του υλικού κόσμου (σχηματισμός πετρωμάτων, δημιουργία σεισμών), και εκείνα του Βιολογικού κόσμου (αύξηση, πολλαπλασιασμός και εξέλιξη των οργανισμών) χωρίς την ύπαρξη των ατόμων.



Εικ. 7: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα των ιονιζουσών ακτινοβολιών και μερικές ενδεικτικές τιμές ενέργειας φωτονίων (σε ηλεκτρονιοβόλτ- ev).

Μια άλλη άποψη είναι πως οι εκδηλώσεις τελικά του βιολογικού και του υλικού κόσμου είναι αποτελέσματα κάποιων ιδιοτήτων των ατόμων που τα αποτελούν.

Ο άνθρωπος βέβαια σαν κυρίαρχο ον πάνω στη Γη μπορεί και παρεμβαίνει, μέχρι ένα βαθμό, στις παραπάνω υλικές και βιολογικές διαδικασίες με σκοπό τη βελτίωση (δυστυχώς όχι πάντα) της ποιότητας ζωής του.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, τους φορείς της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ονομάζουμε φωτόνια δηλαδή κβάντα φωτός (το κβάντον κατά Planck αποτελεί το στοιχειώδες ποσόν οποιασδήποτε μορφής ενέργειας, δυναμικής, κινητικής, κ.λπ.) Κάθε φωτόνιο περιέχει ενέργεια $E = h \cdot \nu$ ή κατόπιν της αντικατάστασης των σταθερών:

$$E = \frac{12.400}{\lambda} \text{ ev } (\lambda \text{ σε } \text{Å}).$$

Από την εξίσωση αυτή παρατηρούμε ότι χαρακτηριστικό κάθε ακτινοβολίας, μήκους κύματος λ αποτελεί η ενέργεια E κάθε φωτονίου. Οι διαφορετικές ιδιότητες κάθε ακτινοβολίας οφείλονται ακριβώς σ' αυτή τη διαφορά ενέργειας των φωτονίων.

Με βάση την επίδραση των ακτινοβολιών στην ύλη διαχωρίζουμε το όλο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα σε δύο τμήματα (εικ. 7).

Σαν σημείο διαχωρισμού επιλέχθηκε το μήκος κύματος των 1.000 Å γιατί αυτό εμφανίζει ενέργεια φωτονίων

$$E = \frac{12.400}{1.000} = 12,4 \text{ ev}$$

Η ενέργεια αυτή θεωρείται ικανή να προκαλέσει ιονισμό ενός ατόμου. Φωτόνια με ενέργεια μικρότερη της τιμής αυτής δεν είναι δυνατόν να ιονίσουν ένα άτομο αλλά μόνο να το διεγείρουν. Αντίθετα φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη των 12,4 ev είναι δυνατόν να διώξουν ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια από ένα άτομο δηλαδή να προκαλέσουν ιονισμό.

Ο διαχωρισμός αυτός εξ' άλλου έχει δημιουργήσει δύο κλάδους Βιολογικής έρευνας: τη *Φωτοβιολογία* και τη *Ραδιοβιολογία*. Η Φωτοβιολογία ασχολείται με τα αποτελέσματα της επίδρασης των μη ιονιζουσών ακτινοβολιών στη ζωντανή ύλη (φωτοτακτισμός, φωτοσύνθεση, κ.λπ.), ενώ η Ραδιοβιολογία ασχολείται με τις επιπτώσεις και τις βιο-ιατρικές εφαρμογές των ιονιζουσών ακτινοβολιών (Ραδιομόλυνση, ακτινοθεραπεία, ακτινοδιάγνωση, ιχνηθέτηση-ραδιοϊσότοπα, RIA, κ.ά.).

Παραδείγματα:

1) Υπολογισμός ακτίνας ατόμου:

Τα διάφορα άτομα έχουν ακτίνα που κυμαίνεται από 1 μέχρι 5.5 Å και που υπολογίζεται από τη σχέση

$$r_A = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{m_A}{\rho}} \quad (\text{σε cm}),$$

όπου ρ η *πυκνότητα* του υλικού και m_A η *απόλυτη μάζα* των ατόμων. Αυτή ισούται με το πηλίκο της σχετικής ατομικής μάζας A_r δια του αριθμού Avogadro NA ($= 6.023 \cdot 10^{23}$ άτομα/γραμμάτομο).

Έτσι, π.χ. για τον χαλκό με $A_r = 63.54$ gr και $\rho = 8.9$ gr/cm³, έχουμε:

$$m_A = \frac{63.54 \text{ gr}}{6.023 \cdot 10^{23}} = 10.55 \cdot 10^{-23} \text{ gr και κατά}$$

συνέπεια η ακτίνα ατόμου θα είναι:

$$r_A = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{10.55 \cdot 10^{-23} \text{ gr}}{8.9 \text{ gr/cm}^3}} = 1.14 \cdot 10^{-8} \text{ cm} = 1.14 \text{ \AA}$$

2) Ισοδυναμία μάζας και ενέργειας.

Η ενέργεια που μπορεί να εκλυθεί από τη μετατροπή 10 gr μάζας ουρανίου αντιστοιχεί με καύση 24.000 τόννων πετρελαίου (από την εξίσωση $E = m \cdot c^2$).

3) Υπολογισμός αριθμού μορίων

Πόσος χρόνος θα χρειαζόταν για να μετρηθούν τα άτομα ενός γραμμαρίου νερού αν μετρούσαμε 1.000.000 το δευτερόλεπτο (!):

Ο αριθμός μορίων σε 1 γραμμάριο είναι $6.023 \cdot 10^{23}$ μόρια, σε 1 γραμμάριο θα είναι 1/18 δηλ.

$$\frac{6.023 \cdot 10^{23}}{18} = 33.5 \cdot 10^{21} \text{ μόρια}$$

Για να μετρηθούν με ρυθμό $10^6/\text{sec}$.

Χρειάζονται $33.5 \cdot 10^{21} / 10^6 = 33.5 \cdot 10^{15}$ sec δηλ. **1.000.000.000 χρόνια** (!!!)

Κεφάλαιο 2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΙΟΝΙΖΟΥΣΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ

2.1. Τρόποι παραγωγής και προέλευσης της ακτινοβολίας

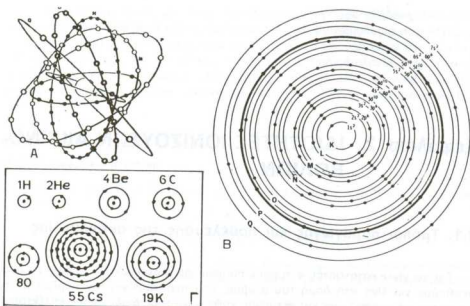
Για να γίνει κατανοητός ο τρόπος παραγωγής φωτονίων θα πρέπει να αναφερθούμε για λίγο στη δομή του ατόμου, που περιλαμβάνει τον πυρήνα με τα συγκεντρωμένα πρωτόνια και νετρόνια, καθώς και τους διαδοχικούς «ηλεκτρονικούς φλοιούς» ή στιβάδες στις οποίες κινούνται τα ηλεκτρόνια ακολουθώντας ορισμένες απαγορευτικές αρχές. Π.χ. η πρώτη στιβάδα (φλοιός K) έχει το πολύ 2 ηλεκτρόνια, η δεύτερη (φλοιός L) έχει το πολύ 8, κ.ο.κ. ακολουθώντας το νόμο $2n^2$ (εικ. 8). Όπως έχει αποδειχθεί από τη θεωρία των De Broglie και Bohr, τα ηλεκτρόνια αυτά αν και κινούνται γύρω από τον πυρήνα εν τούτοις βρίσκονται σε ενεργειακή ισορροπία. Έτσι δεν παρατηρείται καμία εκπομπή ή απορρόφηση, ακτινοβολίας παρά μόνο αν γίνει μετακίνηση από τη μια στιβάδα στην άλλη. Όσο αυξάνεται η διάμετρος της στιβάδας τόσο η ενεργειακή κατάσταση του ηλεκτρονίου αυξάνει. Η ολική ενέργεια ενός ατομικού (πλανητικού) ηλεκτρονίου εξαρτάται από τη θέση του στον αντίστοιχο φλοιό ή υποφλοιό. Είναι συνεπώς σαφές ότι ένα ηλεκτρόνιο θα μπορούσε να μεταπηδήσει σε στιβάδα (ή υποφλοιό) μεγαλύτερης διαμέτρου όταν απορροφήσει ενέργεια π.χ. με κάποιο φωτόνιο.

Πολύ γρήγορα όμως επανέρχεται στην αρχική του τροχιά ελευθερώνοντας την επιπλέον ενέργεια με μορφή φωτονίου (εικ. 9). Αν αυτή η επαναφορά γίνει σε εξωτερικές στιβάδες, τότε τα εκπεμπόμενα φωτόνια έχουν μικρή ενέργεια και συνήθως εμπίπτουν στο ορατό φάσμα π.χ. για φωτόνια μήκους κύματος 4.000 Å (μπλέ φως) μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια ως εξής: $E = h \cdot \nu$ και $c = \lambda \cdot \nu$ οπότε

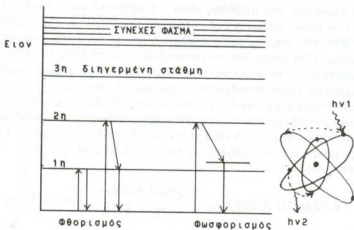
$$E = h \frac{c}{\lambda} = 6,625 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{sec} \frac{300.000 \text{ Km/sec}}{4.000 \text{ \AA}} = \sim 5 \cdot 10^{-12} \text{ erg} = 3,1 \text{ ev}$$

(αφού $1 \text{ ev} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ erg}$)

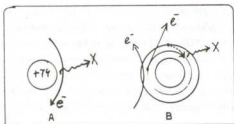
Πρόκειται συνεπώς για πάρα πολύ μικρή ενέργεια φωτονίων. Αντίθετα, η μετακίνηση σε εσωτερικές στιβάδες κοντά στον πυρήνα δημιουργεί φωτόνια με-



Εικ. 8: Α: Σχηματική παράσταση των ηλεκτρονικών φλοιών του στοιχείου ουρανίου (U). Β: Σχηματική απεικόνιση της κατανομής των ηλεκτρονίων σε φλοιούς (K,L,M,N,O,P,Q) και σε υποφλοιούς (s,p,d). Π.χ. 3d¹⁰ σημαίνει: τρίτος φλοιός, τρίτος υποφλοιός, δέκα ηλεκτρόνια. Γ: Σχηματική απόδοση μερικών ατόμων όπου φαίνεται η κατανομή των ηλεκτρονίων σε φλοιούς. Η διάμετρος του πυρήνα είναι περίπου $3 \cdot 10^{-13}$ cm και το ειδικό του βάρος περίπου 10^{14} gr/cm³, ενώ η απόσταση των ηλεκτρονίων φτάνει τα 10^8 cm.



Εικ. 9: Ενεργειακές στάθμες διέγερσης και ιονισμού ενός ατόμου. Η μεταπήδηση σε ανώτερη στάθμη συνεπάγεται απορρόφηση ενέργειας, ενώ αντίθετα η πτώση σε χαμηλότερη στάθμη γίνεται με αποβολή ενέργειας (φωτόνιο) είτε άμεσα (φθορισμός) είτε έμμεσα (φωσφορισμός).

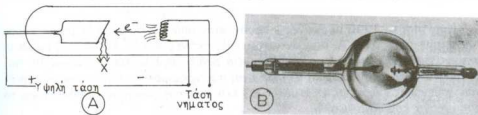


Εικ. 10: Τρόπος παραγωγής των ακτίνων-X με διέλευση ηλεκτρονίου κοντά από πυρήνα (A) οπότε το ηλεκτρόνιο χάνει ενέργεια που μετατρέπεται σε φωτόνιο ακτίνων-X. Άλλος τρόπος (B) είναι η εκδίωξη ηλεκτρονίου που ακολουθείται από πτώση ηλεκτρονίων ανώτερης στιβάδας με ταυτόχρονη εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας φωτονίων-X.

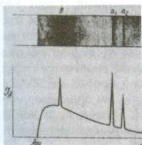
γάλης ενέργειας: έτσι προκαλείται το φάσμα φωτονίων των ακτίνων -X. Οι **ακτίνες -X** παράγονται όταν ηλεκτρόνια μεγάλης ταχύτητας προσπίπτουν σε μεταλλική επιφάνεια (εικ. 10). Η διαδικασία βέβαια πραγματοποιείται μέσα σε λυχνία κενού (π.χ. πειράματα Roentgen σε λυχνία Crookes) (εικ. 11). Οι σύγχρονες λυχνίες υψηλού κενού Coolidge λειτουργούν με θερμοϊονική εκπομπή ηλεκτρονίων και το παραγόμενο φάσμα είναι συνεχές αλλά εμφανίζει και χαρακτηριστικές γραμμές (εικ. 12). Η ανώτερη τιμή του φάσματος μπορεί να υπολογιστεί από τις σχέσεις:

$$eV = \frac{1}{2} mv^2 = h \cdot \nu$$

Πριν από το 1940 οι ισχυρότερες **ακτίνες X** παράγονταν με τις συσκευές που και σήμερα χρησιμοποιούνται στη ραδιοθεραπεία, που λειτουργούν με 400 KV. Η παραγόμενη μέσω αυτών δέσμη ακτίνων X αποτελείται από ακτίνες διάφορου μήκους κύματος. Για να υπολογίσουμε το μήκος κύματος των ακτίνων εκείνων της δέσμης που έχουν τη μεγαλύτερη ενέργεια (δηλαδή το μικρότερο μήκος κύματος), διαιρούμε τον σταθερόν αριθμό 12,4 με τα κιλοβόλτ της συσκευής. Η μέση ενέργεια όλων των παραγόμενων από τη συσκευή ακτίνων X θα



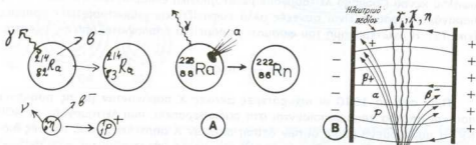
Εικ. 11: Σωλήνας Coolidge διαγραμματικά (A) και σε φωτογραφία (B). 1: νήμα βολφραμίου για εκπομπή ηλεκτρονίων, 2: άνοδος από χαλκό και βολφράμιο, 3: παράθυρο από όπου εκπέμπονται οι ακτίνες-X.



Εικ. 12: Χαρακτηριστικό φάσμα φωτονίων ακτίνων-X. Η μέγιστη ενέργεια των φωτονίων αυτών δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια των ηλεκτρονίων που τα παρήγαγαν δηλ. $E = h \cdot \nu \leq 1/2 m \cdot v^2$.

ισούται με το ήμισυ της κατά τα ανωτέρω ευρισκομένης τιμής. Έτσι το φάσμα των ακτίνων X που παράγονται από τις σύγχρονες συσκευές ραδιοθεραπείας, φθάνει μέχρι 0.03 Å με μέσο μήκος κύματος 0.06 Å. Κατά τα τελευταία χρόνια η χρησιμοποίηση νέων ισχυρών επιταχυντικών συσκευών, όπως είναι οι γραμμικοί επιταχυντές, το βήητρον, το σύγχροτρο, το μικροτρον και ο επιταχυντής Van De Graaff, έκανε δυνατή την παραγωγή ακτίνων X, που αντιστοιχούν σε πολλά εκατομμύρια βόλτ και έχουν συνεπώς μήκος κύματος όσο και οι ακτίνες γ (0,01 Å) ή και ακόμα μικρότερο.

Ακτίνες -γ: Πρόκειται για φωτόνια μεγάλης ενέργειας δηλ. μεγαλύτερης από 100.000 ηλεκτρονιοβόλτ (ev) που δημιουργούνται κατά τη μετατροπή ενός νετρονίου του πυρήνα σε πρωτόνιο ή και κατά την επαναφορά σε κατάσταση ηρεμίας ενός διηγερμένου πυρήνα (εικ. 13).



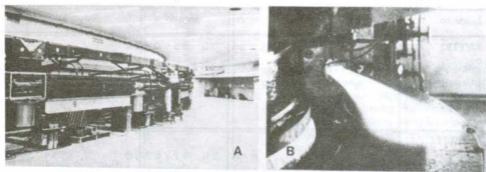
Εικ. 13: Α: Τρόπος παραγωγής φωτονίων-γ κατά την πυρηνική διάσπαση (ραδιενέργεια) όπου η εκπομπή σωματιδίου-α ή σωματιδίου-β μπορεί να συνοδεύεται από εκπομπή φωτονίου-γ συγκεκριμένης ενέργειας (Τα σωματίδια-β που παράγονται έχουν συνήθως φάσμα ενεργειών). Β: Ιδιότητες σωματιδίων και φωτονίων.

Πριν από το 1940 οι ακτίνες γ παράγονταν από το ράδιο, το δε μήκος κύματος αυτών ήταν 0,01 Å, που αντιστοιχεί σε ακτίνες X $1,2 \times 10^6$ βόλτ. Σήμερα οι ακτίνες γ λαμβάνονται κυρίως από τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα (πίνακας III) παραγόμενα μέσα στην ατομική στήλη. Έτσι π.χ. χρησιμότερη πηγή καθαρών ακτίνων γ μεγάλης ενέργειας (1,1 μέχρι 1,3 εκατομμύρια ηλεκτρονικά βόλτ) είναι το ραδιενεργό κοβάλτιο (Co^{60}).

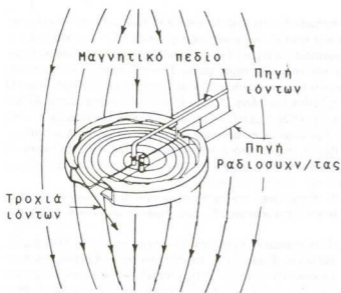
Σωματίδια -α: (πυρήνες ηλίου με δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια). Έχουν δύο θετικά φορτία και μάζα 4, εκπέμπονται δε από μερικές ραδιενεργές ουσίες (εικ. 13) και κυρίως από το ραδόνιο (προϊόν της φυσικής διάσπασης του ραδίου) και το πολώνιο. Το τελευταίο τούτο εκπέμπει καθαρές ακτίνες -α, ενώ το ραδόνιο εκπέμπει επίσης ακτίνες -β. Ακτίνες -α πολύ μικρής ενέργειας παράγονται επίσης κατά την τεχνητή διάσπαση του βορίου ή του λιθίου από βραδέα νετρόνια.

Σωματίδια -β: Πρόκειται για ηλεκτρόνια με αρνητικό φορτίο και δημιουργούνται κατά την πυρηνική διάσπαση ασταθών πυρήνων (εικ. 13, Πίνακες II, III και V) αλλά και από ειδικούς επιταχυντές (εικ. 14) όπου η ενέργεια τους μπορεί να φτάσει τα 6.000 Mev (6 δισεκατομμύρια ηλεκτρονιοβόλτ).

Πρωτόνια (p). Αυτά είναι πυρήνες υδρογόνου με μάζα = 1 και θετικό φορτίο. Παράγονται από ειδικό κυκλοτρόνιο (synchrocyclotron) (εικ. 15) και γεννήτρια Van de Graaff. Η ενέργειά τους μπορεί να φτάσει τα 350 Mev. Στην Ελλάδα, λειτουργεί επιταχυντής πρωτονίων στο Ινστιτούτο Φυσικής του «Κέντρου Πυρηνικών Ερευνών» Δημόκριτος, που «αποφλοιώνοντας» διάφορα άτομα, επιταχύνει με 5.000.000 βόλτ, πρωτόνια, δευτερόνια, τριτόνια και άλλα βαρειαύα ιόντα μέχρι τελική ενέργεια 10 Mev.



Εικ. 14: Α: Τμήμα κυκλοτρόνιου που επιταχύνει ηλεκτρόνια τελικής ενέργειας $6 \cdot 10^9$ ηλεκτρονιοβόλτ. Η διάταξη έχει διάμετρο 60 μέτρα και αποτελείται από 48 τεράστιους μαγνήτες μήκους 40 μέτρα ο καθένας (για διατήρηση της κυκλικής τροχιάς) και από γεννήτρια ραδιοσυχνότητας (για την επιτάχυνση). Β: Τμήμα κυκλοτρόνιου που παράγει δέσμη δευτερονίων τελικής ενέργειας 11 Mev.



Εικ. 15: Διαγραμματική απεικόνιση λειτουργίας κυκλοτρόνιου για επιτάχυνση ηλεκτρονίων ή πρωτονίων (πρωτονιοσύγχροτρο). Διακρίνονται οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου, η πηγή ιόντων, το σημείο εισόδου της ραδιοσυχνότητας και το σημείο εξόδου των σωματιδίων που επιταχύνθηκαν.

Νετρόνια: (n) Αυτά είναι σωματίδια που έχουν μάζα 1, αλλά δεν φέρουν ηλεκτρικό φορτίο. Ταχεία νετρόνια παράγονται σήμερα είτε από το κύκλοτρο, είτε από την ατομική στήλη, ή επίσης έμμεσα με τον επιταχυντή Van de Graaff ή ακόμα απλούστερα με βομβαρδισμό του βηρυλλίου από σωματίια α. Απλή πηγή νετρονίων μικρής ισχύος είναι το σύμπλοκο αλάτι RaBeF₄.

Τα χαρακτηριστικά των παραπάνω ιονίζουσών ακτινοβολιών φαίνονται συμπερασματικά στον Πίνακα II.

ΠΙΝΑΚΑΣ II. Άμεσες και έμμεσες Ιονίζουσες ακτινοβολίες

Σύμβολο	Τύπος	Μάζα	Φορτίο	Προέλευση
ΑΜΕΣΕΣ				
α	⁴ He	4	2+	Πυρηνική διάσπαση
β	e ⁻	0,000549	-	»
β ⁺	e ⁺	0,000549	+	»
p	¹ 1H	1	+	Επιταχυντής
d	² 1H	2	+	»
ΕΜΜΕΣΕΣ				
γ	Ηλεκ/ακτι.	0	0	Πυρηνική Διάσπαση
X	»	0	0	Γεννήτρια ακτίνων X
η	⁰ η	1	0	Πυρηνική Διάσπαση Πυρηνική Σύντηξη

2.1.1. Ενέργεια και ένταση δέσμης ακτινοβολίας

Εδώ θα πρέπει να επισημανθεί ότι ενώ τα φωτόνια των ακτίνων -X και γ κινούνται με την ταχύτητα του φωτός σύμφωνα με τις σχέσεις $E = h \cdot \nu$ και $\nu \cdot \lambda = c$, αντίθετα τα διάφορα σωματίδια (β,α,p,n) έχουν ποικίλλη ταχύτητα που καθορίζονται από την ενέργεια και τη μάζα τους, αφού $E = 1/2 m \cdot v^2$.

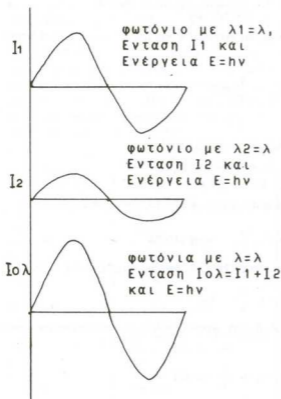
Αυτό βέβαια σημαίνει ότι διαφορετικής μάζας σωματίδια με ίδια ενέργεια (E) αποκτούν διαφορετική ταχύτητα (το ελαφρύτερο «τρέχει» γρηγορότερα). Ακόμα δεν θα πρέπει να ξεχνάμε ότι κάθε σωματίδιο μπορεί να εκδηλώσει και κυματική υπόσταση (σύμφωνα με την αρχή του Broglie) με μήκος κύματος $\lambda = h/m \cdot v$.

Η *ενέργεια* E καθορίζει τη συχνότητα ή το μήκος κύματος κάθε φωτονίου ή σωματιδίου *ξεχωριστά* και είναι υπεύθυνη για τον ιονισμό ή τις άλλες επιδράσεις στα άτομα ή στα μόρια.

Αντίθετα η *ένταση* (I) παριστάνει την *πυκνότητα* των φωτονίων ή σωματιδίων και καθορίζει την πυκνότητα κατανομής των προσβαλλομένων μορίων ή ατόμων.

Η Ένταση δεν μπορεί να υποκαταστήσει την Ενέργεια αφού π.χ. 100 φωτόνια που το καθένα έχει ενέργεια 2 ev (ώστε το σύνολο της ενέργειας να είναι 200 ev) *δεν μπορεί* να προκαλέσει ιονισμό όπως μπορεί *ένα* και μόνο φωτόνιο ενέργειας 200 ev. Με άλλα λόγια επιμέρους ενέργειες φωτονίων δεν προστίθεν-

ται σε μία ενιαία ενεργειακή οντότητα αφού έτσι θα ήταν σαν να αλλάζει η συχνότητα του φωτονίου, πράγμα μη επιτρεπτό ενεργειακά (εικ. 16).



Εικ. 16: Σχηματική απόδοση της διάκρισης ανάμεσα στην ενέργεια (E) και στην ένταση (I) των φωτονίων. Η ένταση μπορεί να προστεθεί (π.χ. πολλά φωτόνια), ενώ η ενέργεια αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος κάθε φωτονίου, $E = h\nu$.

Παραδείγματα εξήγησης εννοιών

α) Ακτίνες -X που παράγονται με ηλεκτρόνια υψηλής τάσης 50.000 βόλτ, τι ελάχιστο μήκος κύματος έχουν.

Το ελάχιστο μήκος κύματος (δηλ. η μέγιστη ενέργεια) των φωτονίων-X θα είναι ίδια με εκείνη των ηλεκτρονίων που τα παρήγαγαν δηλ. 50.000 ev.

Συνεπώς $E = ev = 50.000$ και $E = h \cdot \nu = h \cdot c/\lambda$.

$$\text{δηλ. } \lambda = \frac{h \cdot c}{50.000} \text{ και αν αντικαταστήσουμε τις σταθερές } \lambda = 0,248 \text{ \AA}$$

β) Για να ιονιστεί το άτομο του υδρογόνου χρειάζονται 13,6 ev. Πόση είναι η συχνότητα της ακτινοβολίας που απαιτείται: $E = h \cdot \nu$, δηλ.

$$\nu = \frac{E}{h} = \frac{13,6 \text{ ev}}{6,625 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{sec}} = \frac{13,6 \times 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ erg}}{6,625 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{sec}} = 3,3 \cdot 10^{15} \text{ Hz (κύκλοι ανά δευτερόλεπτο)}$$

Το μήκος κύματος αυτής της συχνότητας είναι:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \cdot 10^{10} \text{ cm/sec}}{3,3 \cdot 10^{15} \text{ sec}^{-1}} = 909 \text{ \AA}$$

γ) Το μήκος κύματος (κατά De Broglie) νετρονίων ενέργειας 1 meV υπολογίζεται από τις εξισώσεις:

$$\lambda = h/m \cdot v.$$

και

$$E_{\text{κιν}} = \frac{1}{2} m v^2$$

$$\text{Δηλ: } \lambda = h / \sqrt{2 \cdot E_{\text{κιν}}} = 0,0003 \text{ \AA}$$

(αφού η μάζα ηρεμίας του νετρονίου είναι $m_{0,n} = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$).

δ) Ποιό το μήκος κύματος φωτονίων γ ενέργειας 1,8 meV

$$E = h \cdot \nu \text{ και } c = \lambda \cdot \nu$$

(όπου $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}$ η ταχύτητα του φωτός και $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Joule} \cdot \text{sec}$).

$$\text{Έχουμε: } \lambda = \frac{h \cdot c}{E} = 6,89 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}$$

ε) Τι ενέργεια έχουν φωτόνια μήκους κύματος 12406 \AA: Από τις ίδιες εξισώσεις έχουμε:

$$E = h \frac{c}{\lambda} = 1 \text{ eV}$$

στ) Πόσα φωτόνια μήκους κύματος $\lambda = 1 \text{ \AA}$ (δηλ. μαλακές ακτίνες -X) απαιτούνται για παραγωγή ενέργειας 1 erg:

$$\text{Η ενέργεια ενός φωτονίου είναι: } E = h \cdot \nu = h \frac{c}{\lambda} \text{ (σε erg)}$$

$$\text{Συνεπώς για ενέργεια 1 erg θα απαιτούνται: } n = \frac{1 \text{ erg}}{E \cdot \text{erg/φωτόνια}}$$

$$\text{δηλαδή: } n = \frac{\lambda}{h \cdot c} \text{ φωτόνια} = \frac{1 \text{ \AA}}{6,625 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{sec} \times 3 \cdot 10^{10} \text{ \AA/sec}} = 5 \cdot 10^7 \text{ φωτόνια}$$

ζ) Να υπολογιστεί το ισοδύναμο σε ενέργεια της μάζας ηρεμίας του ηλεκτρονίου: Από την εξίσωση $E = m_0 c^2$ έχουμε $E_{0,e} = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot [3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}]^2 = 81,85 \cdot 10^{-15} \text{ J} = 0,511 \text{ MeV}$.

Για το πρωτόνιο με $m_p = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ είναι $E_{0,p} = 938 \text{ MeV}$.

Για το νετρόνιο με $m_n = 1,674 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ είναι $E_{0,n} = 940 \text{ MeV}$.

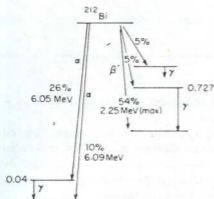
2.1.2. Ραδιοϊσότοπα

Εκτός από φυσικά στοιχεία όπως π.χ. το ράδιο, φαινόμενο ραδιενέργειας (δηλ. πυρηνικής αστάθειας) εμφανίζουν και τα ισότοπα (ή ραδιοϊσότοπα) δηλ. άτομα που έχουν με φυσικά στοιχεία, τον ίδιο αριθμό πρωτονίων (και κατά συνέ-

πεια έχουν τις ίδιες χημικές ιδιότητες) αλλά βέβαια διαφέρουν στον αριθμό νετρονίων. Ονομάζονται *ισότοπα* επειδή κατέχουν την ίδια θέση (τόπο) στον «περιοδικό πίνακα των στοιχείων» του Μεντελέγιεφ. Αυτά τα ισότοπα των φυσικών στοιχείων, είναι ασταθή και διασπώνται ελευθερώνοντας ενέργεια με τη μορφή ακτινοβολίας γ , σωματιδίων α (δηλ. δύο πρωτονίων μαζί με δύο νετρόνια), σωματιδίων β (δηλ. αρνητικά φορτισμένου ηλεκτρονίου), νετρονίων, κ.λπ. Ο ρυθμός διάσπασης του ραδιενεργού ισότοπου εκφράζεται με το *χρόνο υποδιπλασιασμού* που μπορεί να ποικίλει από κλάσμα του δευτερολέπτου μέχρι εκατομμύρια χρόνια. Για κάθε φυσικό στοιχείο μπορούν να υπάρχουν πάρα πολλά ισότοπα, όπως π.χ. για το βισμούθιο που έχει 83 πρωτόνια (δηλ. ατομικός αριθμός) και η σταθερή μορφή του περιέχει 126 νετρόνια στον πυρήνα, δηλ. μαζικός αριθμός 209 (βλ. πίνακα III, εικ. 17).

ΠΙΝΑΚΑΣ III: Ισότοπα Βισμούθιου

Μαζικός αριθμός	Χρόνος ημιζωής	Διάσπαση - Ελευθέρωση ενέργειας
189	< 1,5 sec	σωματίδια α
190-2	< 1 min	α, β^+
193-200	1 min - 1 hr	α, γ, β^+
201-4	1-12 hr	α, γ, β^+
205	15 μέρες	β^+, γ
206	6 μέρες	β^+, γ
207	38 χρόνια	β^+, γ
208	370.000 χρόνια	β^+, γ
209	- σταθερό	-
210	δύο μορφές < 3 εκατ. χρόνια δύο μορφές < 5 μέρες	α, γ α, β^+, γ
211	2 min	α, β^+, γ
212	1 ώρα	α, β^+, γ
213-15	7-4 min	α, β^+, γ



Εικ. 17: Ενεργειακές στάθμες κατά την πυρηνική διάσπαση του Βισμούθιου-212, όπου παράγονται σωματίδια- α , σωματίδια- β και φωτόνια- γ .

Στοιχεία με ατομικό αριθμό μεγαλύτερο του βισμούθιου (83) είναι ασταθή και κατά συνέπεια διασπώνται αποδίδοντας ενέργεια και αλλάζοντας φορτίο (αριθμό πρωτονίων) ή μάζα (πρωτόνια + νετρόνια). Π.χ. το ραδίουκλίδιο ουράνιο-238 υφίσταται 14 διαδοχικές διασπάσεις μέχρι να καταλήξει σε μόλυβδο.

Μερικά από τα ραδιοϊσότοπα που χρησιμοποιούνται στη Βιολογία, φαίνονται στον Πίνακα V. Διακρίνεται η πολύ μικρή ενέργεια σωματιδίων β του H-3 που είναι μόλις 18.000 ev (δηλ. όσο και τα ηλεκτρόνια του καθοδικού σωλήνα σε μία συσκευή τηλεόρασης), σε αντίθεση με την πολύ υψηλή ενέργεια των σωματιδίων- β του φωσφόρου-32 (1.700.000 ev). Οι διαφορές αυτές βέβαια έχουν άμεση σχέση με το χειρισμό και τις προφυλάξεις που απαιτούνται αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για ξεχωριστή μέτρηση των ισοτόπων σε περίπτωση διπλής σήμανσης (βλ. κεφ. 5). Ας σημειωθεί ακόμα ότι όλα τα ισότοπα του Πίνακα V εκπέμπουν μόνο σωματίδια β .

ΠΙΝΑΚΑΣ V. Χαρακτηριστικά μερικών Ραδιοϊσοτόπων που χρησιμοποιούνται στη Βιολογία (Από Shapiro 1972).

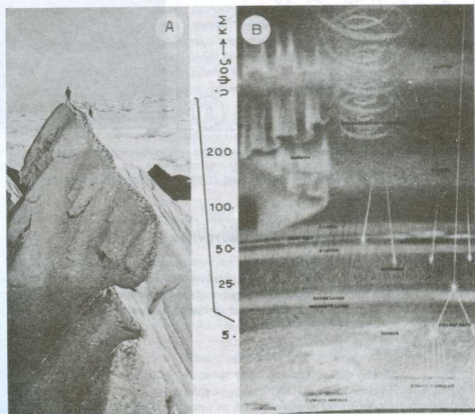
	H-3	C-14	S-35	Ca-45	P-32	Sr-90
Χρόνος Υποδιπλασιασμού	12,3 χρ.	5.730 χρ.	88 ημ.	165 ημ.	14,3 ημ.	28,1 χρ.
Μέγιστη- β (MeV)	0,018	0,157	0,167	0,254	1,71	2,24
Μέση- β (MeV)	0,006	0,050	0,049	0,077	0,70	0,93
Εμβέλεια στον αέρα	6 mm	30 cm	30 cm	60 cm	6 m	9 m
Εμβέλεια στο νερό	5 μ m	0,3 mm	0,3 mm	0,6 mm	8 mm	11 mm
Ρυθμός δόσης από 100 σωματίδια- β ανά $\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ σε m rad/hr)	—	64	60	43	12	11
Κλάσμα που διαπερνά την επιδερμίδα εάν πέσει σταγόνα	—	0,11	0,16	0,37	0,95	0,97
Ρυθμός δόσης σε βασικά επιδερμικά κύτταρα από 1 μ Ci/ cm^2 (σε mrad/hr)	—	2600	3600	5900	4300	3900

2.1.3. Κοσμική ακτινοβολία:

Εκτός από τη γήινη (φυσική ή τεχνητή) προέλευσή τους, ιονίζουσες ακτινοβολίες φθάνουν στη Γη και από το Διάστημα.

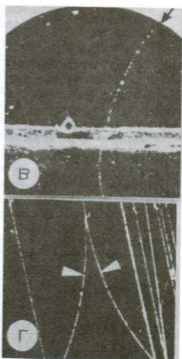
Από το 1900 είχε παρατηρηθεί ότι ο αέρας (ακόμα και σε κλειστά δοχεία) παρουσίαζε ιονισμό. Αν και αυτό το φαινόμενο αποδόθηκε αρχικά στη ραδιενέργεια των ορυκτών της Γης, εν τούτοις έγινε φανερό αργότερα ότι τουλάχιστον δύο ζευγάρια ιόντων σε κάθε κυβικό εκατοστόμετρο δεν προέρχονται από το λόγο αυτό, αλλά από *κοσμικές ακτίνες*. (Hess, βραβείο Nobel).

Σε ύψος 28 km ο ιονισμός είναι μεγαλύτερος και φτάνει τα 240 ζευγάρια ιόντων /cm³, αλλά εξαρτάται πολύ από το γεωγραφικό πλάτος. Ακολουθεί ελάττωση του ιονισμού για μεγαλύτερο ύψος από την επιφάνεια της Γης (εικ. 18). Στον ισημερινό ο ιονισμός είναι μικρότερος από ό,τι σε μεγαλύτερο γεωγ. πλάτος αλλά πρέχεται από κοσμικές ακτίνες μεγάλης ενέργειας (μεγαλύτερης από 100 Mev), αφού οι μικρές ενέργειας ακτινοβολίες επιστρέφουν στο διάστημα με την επίδραση του μαγνητικού πεδίου της Γης. Τα πρωτογενή σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας προέρχονται από το διάστημα που εξ αιτίας του κενού αέρος δεν ανακόπτει την ταχύτητά τους. Στην επιφάνεια της Γης συνήθως δεν φτάνουν τα πρωτογενή σωματίδια αλλά δευτερογενή (εικ. 19) που περιέχουν μεγάλης ενέργειας σωματίδια ικανά να διαπερνούν μέχρι 12 cm πάχος μολύβδινης πλάκας. Τα σωματίδια αυτά έχουν ονομαστεί *μεσόνια* γιατί έχουν μάζα ενδιάμεση ηλεκτρονίων και πρωτονίων (υπάρχουν ακόμα πολλές κατηγορίες μεσονίων όπως τα πόνια, τα μόνια, τα καόνια κ.ά.).



Τροπόσφαιρα - Στρατόσφ. - Μεσόσφ. - Ιονοσφαιρα - Ήλιοσφαιρα

Εικ. 18: Η κοσμική ακτινοβολία είναι μεγάλη σε μεγάλο υψόμετρο (Α) και προκαλείται από σωματίδια μεγάλης ενέργειας που διασχίζουν τα υψηλά στρώματα της ατμόσφαιρας (Β) και δημιουργούν δευτερογενή ακτινοβολία στα χαμηλότερα στρώματα.



Εικ. 19: Α: Φαινόμενα που προκαλούνται από την είσοδο ενός κοσμικού πρωτονίου στην ατμόσφαιρα της Γης. Διακρίνεται επίσης ο τρόπος προέλευσης της ακτινοβολίας εδάφους. Β: Ποζιτρόνιο κοσμικής ακτινοβολίας σε θάλαμο Wilson. Γ: Δίδυμη γένεση ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου (βέλη) από φωτόνιο (Φ).

2.2 Ιδιότητες σωματιδίων και φωτονίων

Οι διάφορες ιονίζουσες ακτινοβολίες (ηλεκτρομαγνητικές και σωματιδιακές) έχουν τις εξής ιδιότητες ως προς τους μηχανισμούς απώλειας ενέργειας που εμφανίζουν καθώς έρχονται σε «επαφή» με άτομα ή μόρια.

2.2.1 Ακτίνες X και γ

Έχουν μικρότερο μήκος κύματος από το ορατό φως (εικ. 12) και γι' αυτό η ενέργεια των κβάντων είναι 10.000 φορές μεγαλύτερη. Ενώ η απορρόφηση του ορατού φωτός εξαρτάται κατά κανόνα από τη μοριακή δομή του υλικού, αντίθετα η απορρόφηση της ενέργειας των ακτίνων X και γ είναι ανεξάρτητη του τρόπου με τον οποίο τα άτομα του υλικού είναι διαταγμένα στο μόριο. Έτσι λοιπόν η δράση των ακτινοβολιών αυτών είναι λιγώτερο εκλεκτική από εκείνη που έχει το

φως. Παράδειγμα: Αν αφήσουμε να περάσει υπεριώδης ακτινοβολία μήκους κύματος 260nm μέσα από μείγμα νουκλεϊνικών οξέων και πρωτεϊνών ίσης συγκέντρωσης, πάνω από 90% της ενέργειας θα απορροφηθεί από τα νουκλεϊνικά οξέα και μόνο το υπόλοιπο 10% θα απορροφηθεί από τις πρωτεΐνες. Αντίθετα, αν χρησιμοποιήσουμε ακτίνες X ή γ τότε δεν παρατηρείται καμιά διαφορικότητα στην απορρόφηση.

Ένα άτομο, που απορροφά ένα φωτόνιο ακτίνων X ή γ, χάνει ένα ηλεκτρόνιο, δηλαδή *ιονίζεται*. Η ενέργεια του απορροφούμενου φωτονίου είναι μεγαλύτερη της ενέργειας της απαιτούμενης για εκδίωξη ενός ηλεκτρονίου από ένα άτομο, η περίσσεια δε αυτή της ενεργείας εναποθηκεύεται στο εκδιωκόμενο ηλεκτρόνιο υπό μορφή κινητικής ενέργειας. Τούτο σημαίνει, ότι το διωγμένο ηλεκτρόνιο έχει αρκετή ενέργεια για να προκαλέσει ionισμό των ατόμων, μέσα από τα οποία διέρχεται. Στην περίπτωση των ακτίνων X και γ των χρησιμοποιούμενων στη Ραδιοβιολογία, όλοι σχεδόν οι ionισμοί προκαλούνται από τα εκδιωκόμενα ηλεκτρόνια, ενώ το αποτέλεσμα της αρχικής απορρόφησης ενός φωτονίου ακτίνων X ή γ είναι κατά κανόνα ασήμαντο. Αυτό έχει σαν συνέπεια, ότι τα παραγόμενα ιόντα δεν κατανέμονται τυχαία μέσω του σώματος που απορροφά, αλλά βρίσκονται συγκεντρωμένα κατά μήκος της τροχιάς των εκδιωκόμενων ηλεκτρονίων, πράγμα που αποτελεί άλλη βασική διαφορά μεταξύ του υπεριώδους φωτός και των ionιζουσών ακτινοβολιών.

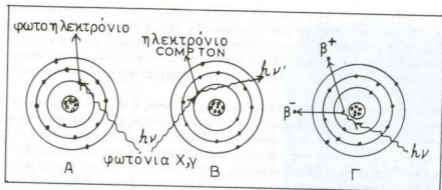
Αν κατά την απορρόφηση μιας ακτινοβολίας από ένα υλικό σώμα δεν προκληθούν χημικές μεταβολές, τότε όλη η ενέργεια των φωτεινών ακτίνων ή των ακτίνων X και γ εμφανίζεται υπό μορφή θερμότητας στο σώμα που την απορρόφησε. Με τις δόσεις των ακτινοβολιών τις χρησιμοποιούμενες στη Ραδιοβιολογία το θερμογόνο αποτέλεσμα είναι, εκτός από ελάχιστες εξαιρέσεις, εντελώς ασήμαντο.

Το μήκος κύματος λ των φωτονίων-γ υπολογίζεται από τη σχέση

$$\lambda = \frac{12,34}{E \text{ (σε Mev)}} \cdot 10^{-3} \text{ \AA}$$

Όλοι οι ionισμοί που προκύπτουν από απορρόφηση ακτίνων X και γ, προκαλούνται από τα παραγόμενα ηλεκτρόνια. Κατά συνέπεια το πρόβλημα της απώλειας ενεργείας της ακτινοβολίας αυτής συνδέεται με τον καθορισμό του αριθμού και της ενέργειας των ηλεκτρονίων αυτών. Τρεις, είναι κυρίως οι μηχανισμοί με τους οποίους η ενέργεια μιας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μπορεί να μεταβιβαστεί στην ύλη, μέσα από την οποία περνά: Το *φωτοηλεκτρικό φαινόμενο*, το *φαινόμενο Compton*, και η *δίδυμος γένεση* (εικ. 20). Ισχύει, πως η απορρόφηση I μιας ακτινοβολίας X ή γ, μέσα από ένα υλικό είναι:

$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$ όπου χ είναι το πάχος των υλικών και ο συντελεστής απορρόφησης είναι $\mu = \mu_c + \mu_{pe} + \mu_p$, δηλαδή
 μ_c = συντελεστής απορρόφησης λόγω φαινομένων Compton
 μ_{pe} = συντελεστής απορρόφησης λόγω φωτοηλεκτρικών φαινομένων
 μ_p = συντελεστής απορρόφησης λόγω δίδυμης γένεσης



Εικ. 20: Τρεις τρόποι απορρόφησης της ενέργειας φωτονίων-γ και φωτονίων-Χ. Α: Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, Β: Φαινόμενο Compton, Γ: Δίδυμη γένεση.

Στο φαινόμενο Compton μέρος της ενέργειας του φωτονίου της ακτινοβολίας μεταφέρεται στο εκδιωκόμενο ηλεκτρόνιο. Συμβαίνει για μέσης ενέργειας φωτόνια και ο συντελεστής απορρόφησης μ_c εξαρτάται από την πυκνότητα της ύλης δηλ. $\mu_c \sim \rho Z/A$. Ισχύει επίσης $E_0 + h\nu' = h\nu - Be$ όπου $E_0 = \eta$ κινητική ενέργεια του εκδιωκόμενου ηλεκτρονίου και $Be = \eta$ ενεργειακή στάθμη του ηλεκτρονίου.

Με άλλα λόγια, το φωτόνιο της αρχικής ακτινοβολίας συγκρούεται με ένα ηλεκτρόνιο ενός ατόμου και μεταβιβάζοντας σ' αυτό μέρος της ενέργειας του το εκδιώκει, ενώ αυτό το ίδιο διατηρεί το υπόλοιπο της αρχικής του ενέργειας, εκτρέπεται της αρχικής του πορείας και εξέρχεται υπό ορισμένη εν σχέση με αυτή γωνία από το άτομο σαν φωτόνιο που έχει μεγαλύτερο του αρχικού μήκος κύματος (εικ. 20). Το ποσό της ενέργειας, το οποίο μεταβιβάζεται κατά την ελαστική αυτή σύγκρουση από το φωτόνιο στο εκδιωκόμενον ηλεκτρονίων αυξάνει γρήγορα, όσο αυξάνει η ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Συνεπώς η συμβολή των ηλεκτρονίων Compton στην απορρόφηση της ολικής ενέργειας αυξάνει με τη σκληρότητα της ακτινοβολίας, ενώ ο ολικός συντελεστής απορρόφησης ελαττώνεται όσο μειώνεται το μήκος κύματος.

Ενώ στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο η απορρόφηση της ενέργειας των φωτονίων δεν είναι κατ' ευθείαν ανάλογη με τον αριθμό των ηλεκτρονίων ανά γραμμάριο της ακτινοβολούμενης ουσίας (ο αριθμός αυτός εξαρτάται από τη στοιχειώδη σύσταση της ουσίας) και η απώλεια της ενέργειας δεν είναι η ίδια μέσα στις διάφορες ουσίες, όπως λ.χ. μέσα στο νερό των ιστών και στις πρωτεΐνες, στο φαινόμενο Compton η απορρόφηση της ενέργειας εξαρτάται εξ ολοκλήρου από τον αριθμό των ηλεκτρονίων ανά γραμμάριο ύλης. Ο αριθμός αυτός κατά τον O.E. Lea δεν ποικίλλει σημαντικά για τα διάφορα στοιχεία και είναι περίπου ο ίδιος (περίπου $3 \cdot 10^{-23}$), για το νερό, για τις περισσότερες από τις οργανικές ουσίες και επομένως και για τους βιολογικούς ιστούς. Τούτο σημαίνει, ότι

προκειμένου περί σκληρών ακτίνων X και ακτίνων γ αρκεί να βαθμολογήσει κανείς με τη βοήθεια ενός μετρητού ιονισμού μια πηγή ακτινοβολίας, με μέτρηση της απώλειας της ενέργειας σε 1 γραμμομόριο αέρα, για να υπολογίσει την απώλεια της ενέργειας σε όλες τις βιολογικές ουσίες.

Στο *φωτοηλεκτρικό φαινόμενο* όλη η ενέργεια του φωτονίου μεταφέρεται στο εκδιωκόμενο ηλεκτρόνιο. Συμβαίνει για μικρές ενέργειες ακτίνες-γ και η απορρόφηση είναι ανάλογη της 5ης δύναμης του ατομικού αριθμού των ατόμων της ύλης, δηλ. $\mu_{pe} \sim Z^5/A$. Ισχύει ακόμα πως $E_e = h\nu - \phi_e$ δηλαδή η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου ισούται προς την ενέργεια του φωτονίου, μείον την ενέργεια που απαιτείται για την εκδίωξη του ηλεκτρονίου από το άτομο. Δεδομένου δε ότι τα ηλεκτρόνια των διαφόρων φλοιών έχουν διαφορετικές ενέργειες έπεται ότι η ενέργεια του εκδιωκόμενου ηλεκτρονίου, το οποίο εδώ ονομάζεται *φωτοηλεκτρόνιο* θα ποικίλλει. Στην περίπτωση των ατόμων που απαρτίζουν την οργανική ύλη και το νερό (τα εν λόγω άτομα ανήκουν σε ελαφριά στοιχεία, όπως ^1_1H , ^6_6C , ^7_7N και ^8_8O) μπορούμε να λάβουμε σα μεγαλύτερη τιμή για την ενέργεια την απαιτούμενη για εκδίωξη ενός εσωτερικού ηλεκτρονίου (φλοιός K) τα 500 eV, ενώ για την απόσπαση ενός εξωτερικού ηλεκτρονίου (φλοιός L) απαιτούνται μόνον 10 eV. Συνεπώς για τις ακτινοβολίες τις χρησιμοποιούμενες στη Ραδιοβιολογία, των οποίων η ενέργεια υπερβαίνει τα 0,1 MeV, οι ενέργειες αυτές δεσμού των ηλεκτρονίων είναι τόσο μικρές, ώστε πρακτικά όλη η ενέργεια του φωτονίου μεταβιβάζεται στο φωτοηλεκτρόνιο, που ως εκ τούτου έχει αρκετή ενέργεια για να προκαλέσει ιονισμούς.

Ο ατομικός συντελεστής απορρόφησης, καθώς και ο μαζικός συντελεστής απορρόφησης κατά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ποικίλλουν ανάλογα με το μήκος κύματος (λ) της ακτινοβολίας και του ατομικού αριθμού (Z) των στοιχείων, από τα οποία αποτελείται η ακτινοβοληθείσα ουσία. Για ένα καθαρό στοιχείο ο ατομικός συντελεστής απορρόφησης τ_a δίνεται με την εξίσωση:

$$\tau_a = c \cdot \lambda^m \cdot Z^n$$

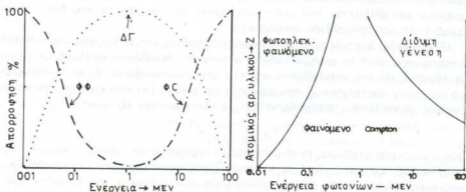
όπου c είναι μία σταθερά, το m αντιστοιχεί περίπου στον αριθμό 3 και το n ποικίλλει μεταξύ 3.5 και 5. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται, ότι η φωτοηλεκτρική απορρόφηση είναι αντίστροφα ανάλογη με την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Τούτο σημαίνει, ότι προκειμένου περί ακτινοβολίας που έχει ενέργεια μεγαλύτερη των 1 MeV, η συμβολή των φωτοηλεκτρονίων στην απορρόφηση της ολικής ενέργειας είναι εντελώς ασήμαντη. Επί πλέον, επειδή η φωτοηλεκτρική απορρόφηση ποικίλλει ανάλογα του Z υψωμένου σε μεγάλη δύναμη, έπεται ότι αυτή είναι πολύ μεγαλύτερη για τα βαρύτερα παρά για τα ελαφρότερα στοιχεία.

Στη *διδυμογένεση* όλη η ενέργεια του φωτονίου υλοποιείται στο πεδίο του πυρήνα και δημιουργεί ένα θετικό (ποζιτρόνιο) και ένα αρνητικό ηλεκτρόνιο (εκ. 20). Το φαινόμενο πραγματοποιείται μόνο όπου το φωτόνιο της ακτινοβολίας X ή γ έχει ενέργεια τουλάχιστον 1,02 MeV [δηλ. το διπλάσιο της μάζας ηρεμίας του ηλεκτρονίου (0,000549) εκπεφρασμένο σε ενέργεια].

Ισχύει: $h\nu - 1,02 \text{ Mev} = Ee^+ + Ee^-$ και η απορρόφηση είναι ανάλογη του

τετραγώνου του ατομικού αριθμού της απορροφώσας ύλης: $\mu_0 \sim \rho Z^2/A$. Το παραγόμενο ζευγάρι ηλεκτρονίων χάνει με τη σειρά του ενέργεια με ιονισμούς και διεγέρσεις. Η συνεισφορά κάθε απορρόφησης φαίνεται στην εικ. 21.

Η διδυμογένεση είναι φαινόμενο ακριβώς αντίθετο από την εξάυλωση της ύλης, κατά την οποία ελευθερώνεται ενέργεια: όλη η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου εμφανίζεται στο ζευγάρι των διδυμων ηλεκτρονίων. Από την ενέργεια αυτή τα μεν 1.02 MeV χρησιμεύουν για να σχηματίσουν την μάζα ηρεμίας των ηλεκτρονίων, το δε υπόλοιπο ανευρίσκεται υπό μορφή κινητικής ενέργειας αυτών. Τα δύο αυτά ηλεκτρόνια, χάνουν εν συνεχεία την ενέργειά τους σε σύγκρουση με ηλεκτρόνια ατόμων, επί πλέον όμως υφίσταται η δυνατότητα να εξουδετερωθεί το θετικό ηλεκτρόνιο, όταν συναντηθεί με ένα αρνητικό ηλεκτρόνιο, τούτο δε είναι τόσο πιθανώτερο, όσο η κινητική του ενέργεια είναι μικρότερη. Κατά την εξουδετέρωση αυτή, η οποία αποτελεί την κατάληξη όλων των θετικών ηλεκτρονίων, η μάζα των δύο σωματιδίων εξαφανίζεται μετατρέπόμενη σε ενέργεια δύο φωτονίων ακτίνων X. Στην περιοχή του βιολογικού ενδιαφέροντος ο ατομικός συντελεστής απορρόφησης για την διδυμογένεση ποικίλλει κατά Z^2 και συνεπώς είναι μεγαλύτερος για ένα γραμμάριο βαριού στοιχείου παρά για ένα γραμμάριο ελαφρού στοιχείου.



Εικ. 21: Ενεργειακή συσχέτιση της απώλειας ενέργειας για τις περιπτώσεις του φωτοηλεκτρικού φαινομένου (Φ_F), του φαινομένου Compton (Φ_C) και της διδυμης γένεσης (ΔΓ).

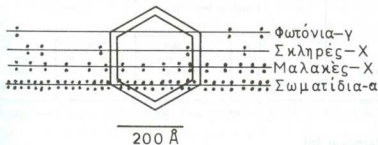
Ο ολικός μαζικός συντελεστής απορρόφησης για όλες τις ουσίες αρχίζει να ελαττώνεται, όταν η ενέργεια της ακτινοβολίας αυξάνει, διότι η απώλεια της ενέργειας που οφείλεται στο φαινόμενο Compton και στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ελαττώνεται. Προκειμένου περί υψηλών ενεργειών ακτινοβολίας η απορρόφηση αυξάνει εκ νέου, διότι η απώλεια της ενέργειας που οφείλεται σε διδυμογένεση αυξάνει όσο η ενέργεια της ακτινοβολίας γίνεται μεγαλύτερη. Η σχέση ενέργειας και απορροφητικότητας για τις τρεις περιπτώσεις είναι διαφορετική (εικ. 21).

2.2.2. Σωματίδια — α

Λόγω του υψηλού τους φορτίου και της μικρής τους ταχύτητας, τα σωματίδια α αναχαιτίζονται εύκολα από την ύλη. Έτσι, στο νερό και στους ιστούς το βάθος διείσδυσης των από του ραδίου εκπεμπομένων σωματίων α ανέρχεται μόλις σε 7 μm . Κατά μήκος της τροχιάς των σωματίων α σχηματίζεται μεγάλος αριθμός ιόντων και συνεπώς η πυκνότητα του ιονισμού είναι πολύ υψηλή (εικ. 22).

2.2.3. Σωματίδια — β (ηλεκτρόνια)

Επειδή τα χημικά και βιολογικά αποτελέσματα από την επίδραση φωτονίων- X και γ προέρχονται από τα εκδιωκόμενα ηλεκτρόνια είναι φανερό ότι παρόμοια δράση έχουν τα πρωτογενή σωματίδια- β που εκπέμπονται από ραδιενεργούς πυρήνες (ραδιονουκλίδια). Η κίνηση των σωματιδίων- β σε μαγνητικό πεδίο είναι ελλικοειδής (εικ. 23) ενώ το βάθος διείσδυσής τους εξαρτάται από την ενέργειά τους, πάντως όμως και για ηλεκτρόνια 2 MeV ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$) ακόμα, το βάθος τούτο δεν υπερβαίνει τα 5-7 χιλιοστά στο νερό ή σε κάποιο βιολογικό ιστό (βλ. πίνακα V). Στην πράξη η μικρή αυτή διεισδυτικότητα των ακτίνων β αντιμετωπίζεται με πλήρη και ομοιομερή διάλυση ραδιοϊσοτόπων μέσα στο διάλυμα ή στον ιστό, που πρέπει να ακτινοβοληθεί. Σημειώνεται ότι στα βιολογικά συστήματα το ισότοπο είναι δυνατόν να συγκεντρωθεί εκλεκτικά σε ορισμένες περιοχές, οπότε η ακτινοβολήση των διαφόρων ιστών δεν είναι ομοιόμορφη (π.χ. ραδιενεργό ιώδιο που συγκεντρώνεται και ακτινοβολεί τον θυρεοειδή αδένα).



Εικ. 22: Γραφική απόδοση της πυκνότητας ιονισμού διαφόρων ακτινοβολιών που διαπερνούν έναν $\text{ί}\delta$ διαμέτρου 270 \AA . Κάθε ζευγάρι τελειών κατά μήκος της πορείας των ακτίνων, παριστάνει ένα ζευγάρι παραγομένων ιόντων.



Εικ. 23: Ελλικοειδής κίνηση ηλεκτρονίων σε μαγνητικό πεδίο.

Ο τρόπος απώλειας ενέργειας των κινουμένων ηλεκτρονίων εμφανίζει σημαντικές διαφορές με εκείνο των βαρειών φορτισμένων σωματιδίων που οφείλεται κυρίως στη μικρή μάζα και στις μεγάλες ταχύτητες των σωματιδίων -β. Έτσι εκτός από το μηχανισμό της ηλεκτρονικής απώλειας ενεργείας τα κινούμενα ηλεκτρόνια χάνουν ενέργεια και με τον τρόπο *ακτινοβολία φρεναρίσματος* (Bremsstrahlung). Κατά τον τρόπο αυτό η απότομη μεταβολή ταχύτητας του ηλεκτρονίου όταν περνά πολύ κοντά από πυρήνα ατόμου προκαλεί εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που έχει ενέργεια όση και η απώλεια ενέργειας του ηλεκτρονίου που μπορεί να είναι από 0% μέχρι 100%. Τέλος, σε ηλεκτρόνια πολύ μεγάλης ενέργειας όπου η ταχύτητά τους ξεπερνά την τιμή c/n (όπου c η ταχύτητα του φωτός στο κενό και n , ο δείκτης διάθλασης του νερού), συμβαίνει απώλεια ενέργειας που συνοδεύεται από εκπομπή μπλέ ακτινοβολίας (φαινόμενο Cerenkov στους πυρηνικούς αντιδραστήρες ανοικτής δεξαμενής νερού).

2.2.4. Πρωτόνια (P)

Σε σχέση με την πυκνότητα ιονισμού που προκαλούν και το βάθος διείσδυσής τους, τα πρωτόνια (με σχετική μάζα=1) καταλαμβάνουν ενδιάμεση θέση μεταξύ των σωματιδίων- α και των σωματιδίων- β (Πίνακας VI).

ΠΙΝΑΚΑΣ VI. Εμβέλεια των σωματιδίων- β , P και α , στον αέρα και σε ιστό, για δύο τιμές αρχικής ενέργειας (οι αρχικές ταχύτητες των σωματιδίων είναι βέβαια διαφορετικές λόγω διαφορετικής μάζας αφού $E=1/2 \cdot m \cdot v^2$).

Σωματίδιο	Εμβέλεια στον αέρα*		Εμβέλεια στον ιστό*	
	1 MeV	5 MeV	1 MeV	5 MeV
β (ηλεκτρόνιο)	33 cm	190 cm	0,42 cm	2,54 cm
P (πρωτόνιο)	2,2 cm	3,4 cm	0,003 cm	0,044 cm
α (2 πρωτόνια)	0,5 cm	3,5 cm	0,0007 cm	0,0045 cm

* Ισχύει: Εμβέλεια στον αέρα X πυκνότητα αέρα=εμβέλεια στον ιστό X πυκνότητα στον ιστό.

2.2.5. Νετρόνια (n)

Κατ' αρχάς διακρίνουμε, ανάλογα με την ταχύτητά τους δύο κατηγορίες νετρονίων, τα *ταχεία* και τα *βραδέα*.

Τα *ταχεία νετρόνια* δεν προκαλούν αμέσως ιονισμό, αλλ' αποσπών πρωτόνια απ' τον πυρήνα των ατόμων, από τα οποία διέρχονται. Συνεπώς τα βιολογικά αποτελέσματα της επίδρασης ταχέων νετρονίων πάνω στην ύλη οφείλονται σχεδόν εξ ολοκλήρου στα εκδιωκόμενα πρωτόνια, όπως ακριβώς τα αποτελέσματα που οφείλονται στις ακτίνες X και γ παράγονται από τα εκδιωκόμενα ηλεκτρόνια. Παρ' όλα αυτά και αντίθετα με ό,τι ισχύει για τις άλλες ιονίζουσες ακτινοβολίες,

ο αριθμός των ιονισμών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη φύση της ατομικής σύστασης της ύλης, δια μέσου της οποίας διέρχονται τα νετρόνια. Έτσι π.χ. ο αριθμός των ιονισμών που προκαλούνται από μια δεδομένη δόση νετρονίων σε 1 γραμμάριο νερού είναι περίπου 2,5 φορές μεγαλύτερος από τον αριθμό των ιονισμών που προκαλούνται από την ίδια δόση σε 1 γραμμάριο αέρα. Το γεγονός αυτό κάνει τη δοσιμετρία των νετρονίων δύσκολη. Τα γρήγορα νετρόνια, όπως και οι ακτίνες X και γ, μπορούν να εισδύσουν σε μεγάλο βάθος μέσα στην ύλη. Τα πρωτόνια που παράγονται αποβάλλονται τυχαία στο εσωτερικό της ουσίας που ακτινοβολείται, οι δε ιονισμοί που προκαλούνται απ' αυτά συγκεντρώνονται κατά μήκος των βραχείων τροχιών τους.

Τα *βραδέα νετρόνια* δεν αποσπούν πρωτόνια, αλλά συλλαμβάνονται από τους πυρήνες των ατόμων, μέσα από τους οποίους διέρχονται, δημιουργώντας έτσι νέους πυρήνες, που είναι ραδιενεργοί. Οι πυρήνες αυτοί γίνονται πηγή ακτίνων β ή γ. Πολλά ραδιενεργά ισότοπα παράγονται σήμερα με τον τρόπο αυτό μέσα στους πυρηνικούς αντιδραστήρες. Σημειώνεται ότι κατά τη στιγμή της σύλληψης του νετρονίου ο πυρήνας εκπέμπει μία ακτίνα γ. Οι αντιδράσεις που οφείλονται στα βραδέα νετρόνια, αν και έχουν μεγάλο ενδιαφέρον από χημικής άποψης, εν τούτοις δεν έχουν μεγάλη σημασία για το βιολόγο. Για τα αφόρτιστα αυτά σωματίδια υπάρχουν τρεις μηχανισμοί απωλείας ενέργειας. Ο πρώτος, η *ελαστική σκέδαση* έχει σημασία για ταχεία νετρόνια. Έτσι, το νετρόνιο συγκρούεται με ένα πυρήνα (π.χ. στα κύτταρα, με πυρήνα ατόμου H, O, N ή C) και αφού μεταβιβάσει ένα μέρος της ενέργειάς του, διώχνουν ένα πρωτόνιο που με τη σειρά του δημιουργεί φαινόμενα φροτισμένων σωματιδίων (βλέπε παραπάνω). Κατά συνέπεια, αποτέλεσμα της ελαστικής σκέδασης είναι η *μεταστοιχείωση* του ατόμου που προσβλήθηκε π.χ. στην ατμόσφαιρα, είναι ο σχηματισμός άνθρακα $^{14}_6\text{C}^{14}$ από άζωτο ($^{14}_7\text{N}^{14}$) με την επίδραση της κοσμικής ακτινοβολίας. Ο δεύτερος μηχανισμός απωλείας ενέργειας έχει σημασία για βραδέα ή θερμικά νετρόνια που λέγεται *σύλληψη νετρονίου*. Στην περίπτωση αυτή τα νετρόνια παγιδεύονται από τους πυρήνες και έτσι δημιουργούνται ασταθείς πυρήνες, ραδιενεργοί που εκπέμπουν ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (ακτίνες γ) ή σωματιδίων β, α ή ρ. Αξίζει να σημειωθεί πως κατά τη στιγμή της παγίδευσης του νετρονίου ο πυρήνας εκπέμπει μια ακτίνα γ. Πολλά ραδιενεργά ισότοπα παράγονται σήμερα με τον τρόπο αυτό μέσα στους πυρηνικούς αντιδραστήρες, όπως π.χ. το ^{131}I από ^{130}Te . Ο τρίτος μηχανισμός λέγεται *ανελαστική σκέδαση* και μέρος της ενέργειας χρησιμεύει για διέγερση του πυρήνα που αντιδρά ελευθερώνοντας φωτόνιο ακτινοβολίας-γ. Με τέτριες διαδοχικές απώλειες ενέργειας το νετρόνιο ισορροπεί θερμικά με το περιβάλλον. Η θερμική του ενέργεια είναι τότε $E\theta = 1/2 \text{ KT}$ (όπου K η σταθερά Boltzman = $1,38 \times 10^{-23}$ joule/kelvin) και T η απόλυτη θερμοκρασία. Για $T = +293^\circ\text{K}$ τότε $E\theta = 0,025 \text{ eV}$.

2.2.6 Βαριά ιόντα

Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα είναι τα *δευτερόνια*, τα οποία έχουν μάζα 2 και φέρουν ένα θετικό φορτίο (πυρήνες βαριού υδρογόνου). Εν σχέσει προς το

βάθος διείσδυσης και την πυκνότητα του απ' αυτά προκαλούμενου ιονισμού, τα δευτερόνια καταλαμβάνουν ενδιάμεση θέση μεταξύ των πρωτονίων και των σωματιδίων-α. Από τα χρησιμοποιούμενα στα πειράματα Ραδιοβιολογίας βαριά σωματίδια που προκαλούν τον πυκνότερο ιονισμό είναι τα άτομα του άνθρακα τα οποία έχασαν 6 ηλεκτρόνια (C^{6+}), με μάζα 12 και φορτίο 6^+

Οι διαφορές και ομοιότητες των υπο-ατομικών σωματιδίων και του φωτονίου-γ φαίνονται στον Πίνακα VII

Πίνακας VII. Χαρακτηριστικά φωτονίων και υποατομικών σωματιδίων

Όνομασία Σύμβολο	Φορτίο	Μαζικός αριθμός	Ιδιοστροφομή (spin)
Πρωτόνιο (P)	+1	1	1/2
Νετρόνιο (n)	0	1	1/2
Ηλεκτρόνιο (e^- ή β^-)	-1	1/1835	1/2
Ποζιτρόνιο (e^+ ή β^+)	+1	1/1835	1/2
Μεσόνιο $\tau(\tau^\pm)$	± 1	965/1835	:
Μιόνιο (μ)	± 1	207/1835	1/2
Πιόνιο (ουδέτερο) P^0	0	264/1835	0
Πιόνιο (φορτισμένο) P^\pm	± 1	273/1835	0
Σωματίδιο α (α)	+2	4	0
Φωτόνιο γ	0	0	1

Παραδείγματα

α) Ακτινοβολία μήκους κύματος $\lambda_1 = 7\text{\AA}$ προσπίπτει σε μόρια και προκαλείται φαινόμενο Compton. Τα αποσπώμενα ηλεκτρόνια έχουν ταχύτητα 10^8cm/sec , ενώ ταυτόχρονα παράγεται φωτόνιο με μήκος κύματος λ_2 , το οποίο ζητείται να υπολογιστεί:

Το αρχικό φωτόνιο έχει ενέργεια $E_1 = h \cdot \nu_1 = h \cdot c / \lambda_1$

Το αποσπώμενο ηλεκτρόνιο έχει κινητική ενέργεια $E_{\text{κιν}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$.

Το παραγόμενο φωτόνιο μεταφέρει ενέργεια $E_2 = h \cdot \nu_2 = h \cdot \frac{c}{\lambda_2}$

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας θα έχουμε:

$$E_1 = E_{\text{κιν}} + E_2 = \frac{m \cdot v^2}{2} + \frac{h \cdot c}{\lambda_2} = \frac{h \cdot c}{\lambda_1}$$

από όπου

$$\lambda_2 = \frac{2h \cdot c \cdot \lambda_1}{2h \cdot c - m \cdot v^2 \cdot \lambda_1}$$

και μετά την αντικατάσταση των τιμών έχουμε $\lambda_2 = 7,012 \text{\AA}$

β) Φωτόνιο κοσμικής ακτινοβολίας προκαλεί διδυμογένεση με ενέργεια 3.2 MeV σε κάθε σωματίδιο. Παράγονται ένα θετικό και ένα αρνητικό ηλεκτρόνιο που αντιστοιχούν σε ενέργεια 1,02

Μεν και τα δυο. Συνεπώς η αρχική ενέργεια είναι $3,2+3,2+1,02=7,42$ Mev, ενώ το μήκος κύματος του κοσμικού φωτονίου μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση $E=h\cdot\nu$ και $c=\lambda\cdot\nu$ δηλ.

$$\lambda = \frac{c\cdot h}{E} = 1,67\cdot 10^{-3}\text{\AA}$$

2.3. Μηχανισμοί απώλειας ενέργειας

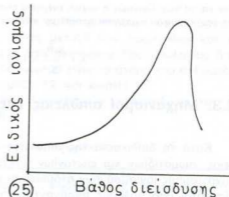
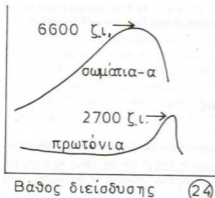
Κατά τη διαδικασία της απώλειας ενέργειας των προϊόντων της ραδιενέργειας, σωματιδίων και φωτονίων γίνεται ανακοπή της πορείας τους κυρίως με μηχανισμούς ιονισμού των ατόμων και των μορίων των υλικών. Η ανακοπή αυτή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως είναι:

- α) Το φορτίο του σωματιδίου (π.χ. σωματίδια α έναντι β)
- β) η μάζα του σωματιδίου (π.χ. σωματίδια-ρ έναντι α) και
- γ) η ενέργεια του σωματιδίου ή του φωτονίου. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονίσουμε τη διαφορά ανάμεσα σε σωματίδια και σε φωτόνια.

Στα πρώτα, η ενέργεια παρέχει και μια αντίστοιχη ταχύτητα σύμφωνα με την εξίσωση $E=1/2 m\nu^2$ η οποία και εξαρτάται από τη μάζα του σωματιδίου, ενώ στα φωτόνια η ταχύτητα είναι c/n (όπου C, n ταχύτητα του φωτός στο κενό και n , ο δείκτης διάθλασης του υλικού). Έτσι, είναι λογικό να αναφερόμαστε σε μείωση (μέχρι και σταμάτημα) της ταχύτητας ενός σωματιδίου, ενώ κάτι τέτοιο δεν έχει νόημα για ένα φωτόνιο του οποίου η ενέργεια συνήθως απορροφάται ολικά ή εν μέρει (οπότε το φωτόνιο αλλάζει συχνότητα αλλά όχι ταχύτητα) από ατομικά ή μοριακά ηλεκτρόνια.

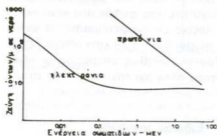
2.3.1. Γραμμική μεταβίβαση ενέργειας — Ειδικός ιονισμός

Ένα σωματίδιο ή ένα φωτόνιο δημιουργεί ιόντα στο πέρασμά του μέσα από την ύλη καθώς χάνει ενέργεια (εικ. 22) ώστε τελικά να απορροφηθεί πλήρως είτε παγιδευόμενο (π.χ. ηλεκτρόνιο) είτε μεταβιβάζοντας όλη του την ενέργεια (π.χ. φωτόνιο). Η παράμετρος που εκφράζει τη διαδικασία αυτή λέγεται *LET* (linear energy transfer/γραμμική μεταβίβαση ενέργειας) και μετράται σε Kev απώλεια ενέργειας ανά μη μήκους της τροχιάς του σωματιδίου ή του φωτονίου (Πίνακας VIII) Η LET είναι ανάλογη του τετραγώνου του φορτίου και αντίστροφα ανάλογη της ταχύτητας ($\sim q^2/v$). Έτσι η LET σωματιδίων-α είναι τετραπλάσια εκείνης για σωματίδια-β (με την ίδια ταχύτητα) (εικ. 24) ενώ παράλληλα τα φωτόνια-X και γ (που κινούνται με την ταχύτητα του φωτός) έχουν μικρότερες τιμές LET από συνηθισμένης ενέργειας σωματίδια-α νετρόνια και πρωτόνια. Ένα άλλο συμπέρασμα που βγαίνει από την παραπάνω σχέση είναι πως η τιμή LET αυξάνει στο τέλος της τροχιάς ενός σωματιδίου (εικ. 25). Μια άλλη έννοια που εκφράζει περίπου το ίδιο πράγμα είναι ο *ειδικός ιονισμός* δηλ. ο αριθμός ζευγαριών ιόντων ανά μη τροχιάς του σωματιδίου ή φωτονίου (εικ. 26). Εδώ χρησιμοποιείται θάλαμος Wilson για την παρατήρηση του ιονισμού (Εικ. 27) αλλά και για τον υπο-

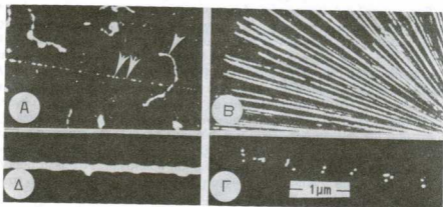


Εικ. 24: Μεταβολή ειδικού ιονισμού σωματιδίων-α και πρωτονίων σε συνάρτηση με την πορεία τους.

Εικ. 25: Σχετική μεταβολή της πυκνότητας ιονισμού σωματιδίων-α παραγόμενων από ρόδιο-226.



Εικ. 26: Ειδικός ιονισμός (αριθμός ζευγαριών ιόντων που δημιουργούνται ανά μm) για σωματίδια-α και για πρωτόνια, σε συνάρτηση με την ενέργειά τους.



Εικ. 27: Σχηματισμός ιόντων από διάφορα σωματίδια σε θάλαμο Wilson. Α: Ηλεκτρόνια με πολύ μικρή (βέλος) και πολύ μεγάλη (ίδιό βέλος) ενέργεια. Β: Σωματίδια-α από ραδιενεργό πολώνιο. Γ: Ζευγάρια ιόντων από σωματίδια-β ενέργειας 1 Mev. Δ: Ιονισμός από πρωτόνια.

λογισμό της τιμής LET. Πολλές φορές επίσης αναφέρεται η έννοια του *μέγιστου ειδικού ιονισμού* που εκφράζει την ενέργεια εκείνη κατά την οποία το σωματίδιο εμφανίζει το μέγιστο παραγωγής ιονισμένων ατόμων. Π.χ. για τα σωματίδια-β η ενέργεια αυτή είναι μόλις 0,000146 Mev και παράγονται περίπου 770 ζευγάρια ιόντων ανά μμ τροχιάς ενός σωματιδίου μέσα στο νερό (βλ. εικ. 26). Είναι βέβαια προφανές ότι σωματίδια-β τόσο μικρής ενέργειας (146 ev) έχουν πολύ μικρή εμβέλεια (βλ. Πίνακα VIII). Για τα σωματίδια-α ο μέγιστος ειδικός ιονισμός επιτυγχάνεται σε ενέργεια 0,37 Mev.

Η γραμμική μεταβίβαση ενέργειας (LET) έχει περιγραφεί από την παρακάτω εξίσωση του Bethe που εκφράζει την απορρόφηση άμεσα ιονίζουσας ακτινοβολίας (μείωση ενέργειας E σε βάθος x) και που εξαρτάται από πολλές παραμέτρους:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{m \cdot v^2} \cdot NZ \ln \frac{2mv^2}{I}$$

όπου ze και v είναι το φορτίο και η ταχύτητα του σωματιδίου, m και e είναι η μάζα και το φορτίο του ηλεκτρονίου, N είναι η πυκνότητα των μορίων του υλικού (π.χ. του ιστού), Z είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων/μόριο του υλικού, και I παριστάνει τη «δυναμικότητα ιονισμού του υλικού» (υπολογίζεται από τη μοριακή σύσταση του υλικού).

ΠΙΝΑΚΑΣ VIII. Τιμές LET και εμβέλειας στο νερό για σωματίδια-β, p, α και για διάφορες αρχικές ενέργειες (Από Shapiro, 1972)

Σωματίδιο	Ενέργεια Mev	Ταχύτητα cm/sec	LET Mev/cm	Εμβέλεια στο νερό
β(ηλεκτρόνιο)	0,01	0,5 · 10 ¹⁰	23	1,36 μm
»	0,1	1,64 · 10 ¹⁰	4,2	118,00 μm
»	1	2,82 · 10 ¹⁰	1,89	3,3 cm
»	10	3 · 10 ^{10*}	2,25	42,0 cm
p(Πρωτόνιο)	1	1,4 · 10 ⁹	271	39 μm
	10	4,4 · 10 ⁹	47	1,2 μm
	100	1,3 · 10 ¹⁰	7,4	75 cm
α(Πυρήνες He)	1	0,7 · 10 ⁹	1410	7,2 μm
	5,3**	1,6 · 10 ⁹	474	47 μm

* Αυτή είναι ταχύτητα του φωτός στον αέρα

** Ενέργεια σωματιδίων-α από Πολώνιο-210

Η τροχιά μιας σωματιδιακής ακτινοβολίας που περνά μέσα από την ύλη, είναι κατά κανόνα μια ευθεία, της οποίας το μήκος μετριέται σε (μm). Εξαιρέση αποτελούν οι τροχιές των ηλεκτρονίων οι οποίες καμπυλώνονται στο τέλος της διαδρομής εξ αιτίας μεγάλου σκεδασμού.

Η ενέργεια που χάνει ένα σωματίδιο κατά τη διαδρομή του μέσα στην ύλη (δηλ. η ποσότητα εν που χάνεται σε κάθε μ τροχιάς) είναι αντίστροφα ανάλογη της ολικής ενέργειας του σωματιδίου. Αυτό σημαίνει πως ο αριθμός των σχηματιζομένων ιόντων/ μ (που άλλωστε εκφράζεται από την μέτρηση της αμέσου απώλειας ενέργειας) είναι αντίστροφα ανάλογη της αρχικής ενέργειας του σωματιδίου. Επειδή το σωματίδιο χάνει συνεχώς ενέργεια γι'αυτό ο *ειδικός ιονισμός* (αριθμός σχηματιζομένων ζευγαριών ιόντων/ μ τροχιάς) *αυξάνει όσο το σωματίδιο πλησιάζει στο τέλος της τροχιάς.*

Σε συμπαγείς ιστούς η απώλεια ενέργειας εκφράζεται με τον «ρυθμό απώλειας ενέργειας» (RLE: rate of loss of energy) και εκφράζεται σε eV/ μ . Το RLE ισούται με 32.5 (ή 35) eV επί τον ειδικό ιονισμό.

Ο ειδικός ιονισμός για τα φορτισμένα σωματίδια είναι ανάλογος του τετραγώνου του φορτίου τους και αντίστροφα ανάλογος της ταχύτητάς τους. Κατά συνέπεια, πρωτόνια και ηλεκτρόνια με την ίδια ταχύτητα παράγουν τον ίδιο αριθμό ζευγαριών ιόντων/ μ τροχιάς, ενώ σωματίδια α (με διπλάσιο φορτίο) με την ίδια ταχύτητα παράγουν τετραπλάσιο αριθμό.

Η ταχύτητα ενός σωματιδίου με δεδομένη ενέργεια είναι αντίστροφα ανάλογη της μάζας του. Π.χ. πρωτόνιο με ενέργεια 200 MeV έχει την ίδια ταχύτητα και κατά συνέπεια παράγει τον ίδιο ειδικό ιονισμό όπως ηλεκτρόνια ενέργειας 150 KeV (γιατί η σχέση μαζών πρωτονίου/ηλεκτρονίου είναι 1800:1). Εξ άλλου, ο αριθμός ιονισμών/ μ τροχιάς για πρωτόνια και ηλεκτρόνια ίδιας ενέργειας είναι πολύ μεγαλύτερος στην περίπτωση των πρωτονίων (εικ. 26).

Όλοι οι ιονισμοί παράγονται κατά μήκος της τροχιάς του σωματιδίου. Αν ακτινοβολήσουμε έναν ιστό με σωματίδια β ενός r (που έχουν έτσι τον κατώτατο ειδικό ιονισμό) τότε παράγονται ζευγάρια ιόντων κατά μήκος της τροχιάς καθ'ενός σωματιδίου σε αποστάσεις 0,2 μ . Οι αποστάσεις μεταξύ τροχιών γειτονικών σωματιδίων β είναι 2 μ . Στην μοριακή κλίμακα η ανομοιογένεια αυτή δεν θεωρείται σημαντική, αφού με το σχηματισμό των «ελευθέρων ριζών» στο κυτταρόπλασμα (βλ. κεφ. 3) όλα σχεδόν τα βιολογικά μόρια υφίστανται την επίδραση της ακτινοβολίας.

Εξ άλλου αν ο ιστός ακτινοβοληθεί με παρόμοια δόση σωματιδίων α τότε θα δημιουργηθούν χιλιάδες ζευγάρια ιόντων/ μ τροχιάς ενώ γειτονικές τροχιές θα απέχουν, η μια από την άλλη, αρκετά cm. Έτσι, είναι φανερό πως οι μοριακές επιδράσεις είναι πολύ διαφορετικές για σωματίδια β σε σχέση με τα σωματίδια α .

Κατανομή των ιόντων στο χώρο. Πληροφορίες για το πρόβλημα αυτό έχουν αντληθεί με τη βοήθεια του θαλάμου ιονισμού Wilson. Το όργανο αυτό λειτουργεί με βάση την αρχή πώς ένα ιόν προκαλεί μία συμπύκνωση σε ένα υπερκορεσμένο σύστημα. Έτσι, όταν ένα ιονίζον σωματίδιο περνά μέσα από ένα χώρο υπερκορεσμένο με υδρατμούς τότε μικροσκοπικές σταγόνες νερού σχηματίζονται γύρω από κάθε δημιουργούμενο ιόν.

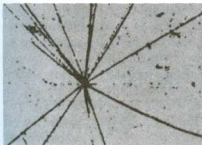
Η τελική κατάσταση μπορεί να φωτογραφηθεί κατάλληλα και να μελετηθεί (εικ. 27). Βρέθηκε πως για κάθε ιονισμό δημιουργούνται δύο τουλάχιστον στα-

γονίδια νερού, που σημαίνει πως το αποβαλλόμενο ηλεκτρόνιο, αφήνοντας πίσω του ένα θετικό ιόν, συλλαμβάνεται από ένα άτομο που έτσι γίνεται αρνητικό. Εκείνο που ονομάσαμε ενέργεια ιονισμού (W) δηλ. 32,5eV, ανάγεται ακριβώς στην δημιουργία ενός τέτοιου ζευγαριού ιόντων.

Το αποβαλλόμενο ηλεκτρόνιο κατά τον πρωταρχικό ιονισμό, μπορεί να έχει πολύ μικρή ενέργεια (θερμικό ηλεκτρόνιο) οπότε δεν μπορεί να ιονίσει άλλο άτομο αλλά απλώς συλλαμβάνεται από αυτό, ή μπορεί να έχει μεγαλύτερη ενέργεια (βραδέα ηλεκτρόνια) οπότε ιονίζει γειτονικά άτομα. Το αποτέλεσμα αυτό φαίνεται στο θάλαμο Wilson σαν συσσωμάτωμα σταγονιδίων.

Υπάρχουν σπάνιες περιπτώσεις στις οποίες το αποβαλλόμενο ηλεκτρόνιο κατά τον πρωταρχικό ιονισμό έχει μεγάλη ενέργεια (πολλές χιλιάδες eV) οπότε φαίνεται (στον θάλαμο Wilson) να διαγράφει ξέχωρη τροχιά (ακτίνα δ).

Πυκνότητα ιονισμού στα υγρά. Η μόνη μέθοδος που χρησιμοποιείται για παρατήρηση της δημιουργίας ιονισμών σε συμπυκνωμένα συστήματα είναι η χρησιμοποίηση «φωτογραφικών» ή «πυρηνικών γαλακτωμάτων» (emulsion). Ένα τέτοιο γαλάκτωμα περιέχει ευαίσθητα μόρια αργύρου τα οποία αλλοιώνονται όταν προσβληθούν από ιονίζοντα σωματίδια. Έτσι, μετά τη φωτογραφική εμφάνιση του γαλακτώματος και την παρατήρησή του στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο μπορούμε να δούμε τον αριθμό των ιονισμών/μ τροχιάς (εικ. 28). Πάντως η μέθοδος δεν έχει μεγάλη εφαρμογή γιατί δεν μπορεί να δώσει ποσοτικά αποτελέσματα παρά μόνο για σωματίδια μεγάλου LET. Για τους λόγους αυτούς οι τιμές ειδικού ιονισμού που δίνονται για ένα συμπυκνωμένο σύστημα (π.χ. ιστό) βασίζονται, με αναγωγή, στις τιμές αερίου με ίδια πυκνότητα.



Εικ. 28: Τροχιά σωματιδίων σε πυρηνικό γαλάκτωμα όπως φαίνεται με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.


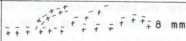

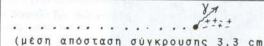
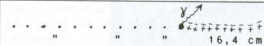


Ένα άλλο απαραίτητο στοιχείο για την κατανόηση της επίδρασης των ιονιζουσών ακτινοβολιών στα βιολογικά συστήματα είναι η γνώση της απόστασης μεταξύ αρνητικών και θετικών ιόντων, στο νερό και στους ιστούς. Η πρόταση των Lea και Grey πως η απόσταση αυτή είναι περίπου 150Å έχει τύχει αυστηρής κριτικής γιατί στηρίζεται εξολοκλήρου σε δεδομένα θαλάμου Wilson. Έτσι, η παραδοχή πως ένα ιονίζον σωματίδιο δημιουργεί τον ίδιο αριθμό ιόντων/γραμμάριο αέρα ή ιστού, είναι προς το παρόν αυθαίρετη.

2.3.2. Ειδικός ιονισμός για τις ακτίνες X και γ.

Στις περιπτώσεις αυτές ο ιονισμός προκαλείται κατά μήκος των τροχιών των ηλεκτρονίων που αποβάλλονται από τα άτομα σαν αποτέλεσμα επίδρασης της ακτινοβολίας (βλέπε φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και φαινόμενο Compton, παράγραφος 2.2.1.). Η ακριβής περιγραφή του ειδικού ιονισμού που προκαλούν ακτίνες X ραδιοθεραπευτικής συσκευής είναι πολύπλοκο πρόβλημα γιατί η ακτινοβολία δεν είναι μονοχρωματική αλλά αποτελείται από διάφορα μήκη κύματος (σκληρές, μαλακές ακτίνες X). Ακόμα, και αν η ακτινοβολία ήταν σχετικά μονοχρωματική, τα ηλεκτρόνια Compton που παράγονται έχουν πλατύ φάσμα ενεργειών.

Σημαντικό είναι πως στην περίπτωση ακτινοβόλησης ιστών με πολύ σκληρές ακτινοβολίες, το μέγιστο της πυκνότητας των ιόντων παράγεται σε ορισμένο βάθος του ιστού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως ο ειδικός ιονισμός είναι μέγιστος στο τέλος της τροχιάς των παραγομένων από την ακτινοβολία ηλεκτρονίων.

Η κατανομή των ιονισμών για διάφορα σωματίδια και φωτόνια φαίνεται στην Εικ. 29.

ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	ΙΟΝΙΣΜΟΙ/ΕΜΒΕΛΕΙΑ
C-14, β^- 0,154 Mev max	 0,29mm
P-32, β^- 1,71 Mev max	 8 mm
Po-210, α 5,3 Mev	 0,037mm
I-125, γ 0,035 Mev	 (μέση απόσταση σύγκρουσης 3,3 cm)
Co-60, γ 1,33 Mev	 16,4 cm
Νετρόνια 1 Mev	 2,6 cm
Πρωτόνια 1 Mev	 Εμβέλεια 0,028 mm

Εικ. 29: Συγκεντρωτική συγκριτική απεικόνιση των ιονισμών που προκαλούνται από διάφορα σωματίδια και φωτόνια ιονίζουσας ακτινοβολίας.

2.3.3. Διεγέρσεις που προκαλούνται από τις ιονίζουσες ακτινοβολίες.

Όπως είδαμε για κάθε παραγόμενο ζευγάρι ιόντων απορροφούνται 32,5 (ή 35) eV. Τα δυναμικά ιονισμού όμως για διάφορα στοιχεία είναι της τάξης των 16 eV(S) και 24,5eV(He). Έτσι, υπάρχει ένα περίσσευμα ενεργείας (32,5-16)eV που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διέγερση του ατόμου δηλ. για μετατόπιση ηλεκτρονίου από μία στοιβάδα σε μία άλλη. Κατά τη θεωρία του Bethe ένα ιονίζον σωματίδιο μπορεί να περάσει μέσα από ένα άτομο χωρίς κατ'ανάγκη να διώξει από αυτό ένα ηλεκτρόνιο αλλά μόνο να μετατοπίσει ηλεκτρόνια από μία στοιβάδα σε μία άλλη μεγαλύτερης ενεργειακής στάθμης. Είναι μάλιστα πιθανό πως ένα σωματίδιο πριν προκαλέσει ιονισμό έχει κιόλας προκαλέσει διεγέρσεις σε άτομα έτσι που η τελική ενέργεια που καταναλώθηκε να είναι 32,5eV.

Σημειώνεται ότι η προαναφερθείσα περίσσεια ενεργείας των 20 eV παριστάνει από άποψη μοριακής ενεργότητας μία μεγάλη ποσότητα (1eV ανά μόριο ισούται με 23,05 κίλοκαλορί ανά γραμμομόριο). Ακόμα, πρέπει να έχουμε υπόψη μας πως 4-5 eV είναι αρκετά για να σπάσει δεσμός μεταξύ δύο ατόμων άνθρακα. Κατά συνέπεια αν η ενέργεια αυτή διέγερσης των 20 eV μεταβιβαστεί σε μικρό αριθμό μορίων τότε είναι σίγουρο πως πολλές χημικές μεταβολές μπορούν να συμβούν για κάθε ζευγάρι σχηματιζομένων ιόντων. Λίγα όμως είναι γνωστά σχετικά με το μηχανισμό των διεγέρσεων που προκαλούνται από ηλεκτρόνια χαμηλής ενέργειας.

Στα συμπυκνωμένα συστήματα τόσο τα διηγεργμένα όσο και τα ιονισμένα μόρια έχουν πολύ μικρό χρόνο ζωής (συνήθως 10^{-9} μέχρι 10^{-6} sec) για διαφορετικό όμως λόγο. Τα πρώτα, είναι εκ φύσεως ασταθή και προσπαθούν να αποβάλλουν κατά τον ένα ή άλλο τρόπο το περίσσευμα ενέργειας. Σε μερικές περιπτώσεις, αυτό οδηγεί κρήγορα (μέσα σε 10^{-13} sec) στη διάσπαση του μορίου. Πιο συχνά, τα διηγεργμένα μόρια παραμένουν για λίγο χρόνο (10^{-9} sec) αμετάβλητα και μετά διασπώνται ή χάνουν το περίσσευμα ενέργειας με εκπομπή φωτός (φθορισμός) ή το μεταβιβάζουν σε γειτονικά μόρια. Πολλές φορές τα προϊόντα διάσπασης του διηγεργμένου μορίου συμπεριφέρονται σαν ελεύθερες ρίζες που είναι χημικά όμοιες με εκείνες που παράγονται εξ'ιονισμού.

Τα ιονισμένα μόρια (που χαρακτηρίζονται και σαν ελεύθερες ρίζες), έχουν μεγάλη ικανότητα αντίδρασης που σ'αυτό οφείλουν το μικρό χρόνο ζωής και όχι σε αστάθεια.

Στην περίπτωση οργανικών μακρομορίων οι πιθανότητες για άμεση διάσπαση του μορίου μετά από διέγερση, είναι πολύ λίγες γιατί το περίσσευμα ενέργειας κατανέμεται στους πολυάριθμους δεσμούς. Ένα τέτοιο διηγεργμένο μακρομόριο μπορεί να χάσει την παραπάνω ενέργεια ή με ταλάντωσή του ή με μεταβίβαση της ενέργειας σε γειτονικά μόρια.

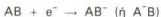
2.3.4. Αντιδράσεις ιόντων

Τα ιόντα που παράγονται κατά την ακτινοβόληση θα έπρεπε να καλούνται

«ιόντα με ελεύθερη ρίζα» γιατί περιέχουν πάντοτε περιττό αριθμό ηλεκτρονίων, (πράγμα που τα διακρίνει από τα σταθερά ιόντα, που δημιουργούνται κατά τη διάσπαση των ηλεκτρολυτών). Η παρουσία ασύζευκτου ηλεκτρονίου, δίδει στα ιόντα αυτά μεγάλη ικανότητα αντίδρασης. Έτσι δύο τέτοια ιόντα, όταν έλθουν σε επαφή, οδηγούνται σε ομοιοπολική σύνδεση. (Αυτό συμβαίνει κυρίως σε μικρά μόρια, γιατί στα ιόντα μεγάλων μορίων επέρχεται σταθεροποίηση λόγω τακτομέρειας κατά την οποία η ενεργότητα του ασύζευκτου ηλεκτρονίου κατανέμεται σε ολόκληρο το μόριο). Συνεπώς, οι ελεύθερες ρίζες, έχουν μεγάλη τάση να αποβάλουν το ασύζευκτο ηλεκτρόνιο ή να συλλάβουν ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο, οπότε ο αριθμός ηλεκτρονίων τους γίνεται άρτιος και έτσι μετατρέπονται σε σταθερά ιόντα. Π.χ. η ελεύθερη ρίζα $\text{OH}\cdot$ αφού συλλάβει ένα ηλεκτρόνιο μετατρέπεται στο σταθερό ιόν OH^- .

Σχηματισμός αρνητικών ιόντων. Το θερμικό ηλεκτρόνιο που αποβάλλεται από ένα μόριο έχει την πιθανότητα να συλληφθεί ή από άλλο μόριο που έτσι γίνεται αρνητικό ιόν ή από θετικό ιόν που έτσι συνεπάγεται ελευθέρωση μεγάλων ποσών ενέργειας. Στα βιολογικά συστήματα, τα μόρια που εμφανίζουν τάση σύλληψης θερμικού ηλεκτρονίου είναι, το μοριακό οξυγόνο και τα μόρια που περιέχουν οξυγόνο, όπως το νερό. Ανάλογη τάση εμφανίζουν και τα αλογόνα.

Η σύλληψη θερμικού ηλεκτρονίου είναι δυνατό να έχει σαν αποτέλεσμα ή το σχηματισμό σταθερού αρνητικού ιόντος:



ή τη διάσπαση του μορίου:



Η πιθανότητα να συμβεί η πρώτη ή η δεύτερη αντίδραση καθορίζεται από την ισχύ των δεσμών και το περιβάλλον. Έτσι, π.χ. το ιόν H_2O^+ είναι σταθερό στην αέρια φάση, αλλά διασπάται στην υγρή φάση.

Εξουδετέρωση των φορτίων. Η σύλληψη ηλεκτρονίου από μία θετική ελεύθερη ρίζα οδηγεί κατά κανόνα σε άμεση διάσπασή της, με πιθανό αποτέλεσμα το σχηματισμό δύο μη φορτισμένων ελεύθερων ριζών, από τις οποίες η μία είναι διηγερμένη.



(ο συμβολισμός $\text{C}\cdot$ ή $\text{D}\cdot$ σημαίνει ρίζα μη φορτισμένη, ενώ $\text{*D}\cdot$ σημαίνει ρίζα διηγερμένη). Το μόριο που παράγεται από την ένωση δύο ελευθέρων ριζών αντίθετου φορτίου διασπάται, εκτός αν κατά τη σύγκρουση των ριζών παράγεται κάποιο τρίτο μόριο που παίρνει την ενέργεια που ελευθερώνεται. Η δυνατότητα αυτή πραγματοποιείται κατά κανόνα στα συμπυκνωμένα συστήματα με αποτέλεσμα το σχηματισμό δύο ελευθέρων ριζών μη φορτισμένων και τη διέγερση ενός τρίτου μορίου M:



Μεταφορά φορτίου. Αν το δυναμικό ιονισμού του μορίου B είναι μικρότερο

από της ελεύθερης ρίζας A^+ , τότε το φορτίο μεταφέρεται από το μόριο A^+ στο μόριο B:



Διάσπαση των ελεύθερων ριζών. Η ελεύθερη ρίζα είναι δυνατόν να είναι ασταθής και να διασπαστεί αυτόματα με διάφορους τρόπους. Π.χ. το μόριο C_4H_{10} , όταν ιονιστεί στην αέριο φάση μετά από επίδραση ιονίζουσας ακτινοβολίας, μετατρέπεται σε ελεύθερη ρίζα:



με δυνατότητες διασπάσεως:

α) $C_4H_{10}^+ \longrightarrow CH_3 \cdot + C_3H_7^+$. Κατά τη διάσπαση αυτή σχηματίζεται μία μη φορτισμένη ελεύθερη ρίζα ($CH_3 \cdot$) και ένα ασταθές ιόν ($C_3H_7^+$) που μετατρέπεται σε σταθερό ιόν με μοριακή ανακατάταξη και ελευθέρωση υδρογόνου:



β) $C_4H_{10}^+ \longrightarrow CH_4 + C_3H_6^+$. Κατά τη διάσπαση αυτή παράγεται ένα σταθερό μόριο (CH_4) και μία ακόρεστη ελεύθερη ρίζα ($C_3H_5^+$).

Σε απλά μόρια ο ιονισμός μπορεί να οδηγήσει σε πλήρη διάσπαση του μορίου, όπως π.χ. $CH_4 \longrightarrow CH_4^+ + e$. Στην υγρή φάση είναι πιθανό πως οι θετικές ελεύθερες ρίζες υφίστανται ανάλογες μεταβολές, χωρίς όμως να υπάρχει πειραματική επιβεβαίωση.

Στα συμπυκνωμένα συστήματα προβλέπουμε τη φύση των αρχικών αντιδράσεων από τη σύσταση των τελικών προϊόντων.

2.3.5. Ανίχνευση ελευθέρων ριζών

Οι ελεύθερες ρίζες (άτομα ή μόρια με ασύζευκτα ηλεκτρόνια) ανιχνεύονται με διάφορους τρόπους όπως η «τεχνική του καθρέπτη», ή «φασματομετρία μάζας», η χρήση μικροκυμάτων και ο «ηλεκτρονικός παραμαγνητικός συντονισμός». Από αυτούς πιο διαδεδομένος είναι ο τελευταίος τρόπος (electron spin resonance) που αναφέρεται και σαν electron paramagnetic resonance, κατά το οποίο γίνεται εφαρμογή (στο υπό μελέτη σύστημα) ενός ισχυρού μαγνητικού πεδίου. Η αρχή είναι η εξής: Σε δείγμα με ελεύθερες ρίζες και με μαγνητικό πεδίο $H=0$, οι μαγνητικές ορμές και τα spin (ιδιοστροφορμές) όλων των ασύζευκτων ηλεκτρονίων θα έχουν τυχαίο προσανατολισμό. Μόλις όμως εφαρμοστεί ένα συνεχές (d.c.) μαγνητικό πεδίο τότε τα ηλεκτρόνια θα προσανατολιστούν παράλληλα ή αντιπαράλληλα στο εξωτερικό πεδίο αυτό. Στην πρώτη περίπτωση τα ηλεκτρόνια θα έχουν ενέργεια $-\frac{1}{2} g\beta H$, ενώ στη δεύτερη $+\frac{1}{2} g\beta H$ (εικ. 30). Ισχύει: $h\nu = g\beta H$ όπου $h\nu = g\beta H$ παριστάνει τη συνθήκη συντονισμού με $\nu = 2,8 \times 10^6 H$ για ελεύθερα ηλεκτρόνια.

Η τιμή g παριστάνει τον «φασματοσκοπικό παράγοντα διάσχισης» (spectroscopic splitting factor) και αποτελεί μέτρο της συνεισφοράς του spin στην όλη γωνιακή ορμή και έχει τιμή 2,0023 για ελεύθερα spin.

Η τιμή β (μαγνητόνη του Bohr) ισούται με $eh/4\pi mc$ και χρησιμεύει για τη μετατροπή της γωνιακής ορμής σε μονάδες c.g.s.

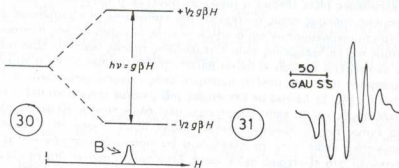
Η εφαρμογή ραδιοσυχνότητας ν στο δείγμα έχει σαν αποτέλεσμα την απορρόφηση ενέργειας από τα ηλεκτρόνια που θα μεταπηδήσουν σε μεγαλύτερες τροχιές ώστε να ικανοποιηθεί η συνθήκη $h\nu = g\beta H$. Συνήθεις τιμές μαγνητικού πεδίου είναι από μερικά gauss μέχρι και 13.000 gauss, ενώ η συχνότητα κυμαίνεται από 9.000 megacycles / sec (3cm μήκος κύματος) μέχρι 36.000 megacycles / sec (8mm μήκος κύματος).

Η έντονη απορρόφηση ενέργειας που συμβαίνει παρουσία ελεύθερων ριζών στο δείγμα αποτελεί και το κριτήριο για την ανίχνευσή τους. Ένα σύστημα esr για το σκοπό αυτό περιλαμβάνει:

- Πηγή ακτινοβολίας ν (βλ. παραπάνω).
- Κυψελίδα τοποθέτησης δείγματος όπου θα εφαρμοστεί η ακτινοβολία ν .
- Μαγνητικό πεδίο (H) d.c. που εφαρμόζεται στο δείγμα.
- Ανιχνευτής απορρόφησης ενέργειας από το δείγμα κατά τη στιγμή του συντονισμού (της ορμής των ηλεκτρονίων με το εφαρμοζόμενο πεδίο H και την ακτινοβολία ν).
- Κατάλληλο σύστημα καταγραφής.

Το τελικό αποτέλεσμα (φάσμα) λαμβάνεται υπό μορφή καμπύλης (εικ. 31), και δείχνει τη θέση και τη μορφή του συντονισμού. Κάθε ουσία και ελεύθερη ρίζα έχει χαρακτηριστικό φάσμα κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες τιμών H και ν .

Η ανίχνευση των ελεύθερων ριζών έχει μεγάλη σημασία αφού έχει διαπιστωθεί συσχέτιση της ύπαρξής τους με το φαινόμενο της χημικής καρκινογένεσης. Εξ'άλλου ελεύθερες ρίζες παράγονται κατά την οξειδοαναγωγή βιομορίων. Η ευαισθησία της μεθόδου φτάνει τα $10^{-9}M$.



Εικ. 30: Αρχή λειτουργίας «συντονισμού ιδιοστροφορμής ηλεκτρονίων» (electron spin resonance - e.s.r.) όπου η εφαρμογή ραδιοσυχνότητας (ν) και μαγνητικού πεδίου (H) στο δείγμα ανιχνεύει την παρουσία ελεύθερων ριζών και δίνει χαρακτηριστικό φάσμα (B) (βλ. κείμενο για λεπτομέρειες).

Εικ. 31: Φάσμα ελεύθερων ριζών που είναι χαρακτηριστικό για κάθε περίπτωση (βλ. κείμενο για λεπτομέρειες).

2.4. Μονάδες μέτρησης της ραδιενέργειας, της έκθεσης, της απορρόφησης και της ισοδύναμης δόσης

Στο πρώτο Συνέδριο Ραδιολογίας που έγινε στα 1925 έγινε προσπάθεια να οριστούν μονάδες για τη μέτρηση των παραμέτρων που συνοδεύουν το φαινόμενο της ραδιενέργειας. Σήμερα, δηλ. 62 χρόνια αργότερα είμαστε σε θέση να μετρήσουμε με κατάλληλα όργανα και να εκφράσουμε με μονάδες όλα σχεδόν τα στάδια, από τη διάσπαση των ραδιονουκλιδίων (που οδηγεί στην εκπομπή σωματιδίων και φωτονίων) μέχρι την εμφάνιση του βιολογικού αποτελέσματος, αν και για το τελευταίο δεν υπάρχει όργανο μέτρησης. Η όλη διαδικασία περιλαμβάνει 1) την *ποσότητα ραδιενέργειας* του ραδιενεργού ατόμου, 2) την *ποσότητα ενέργειας που μεταφέρεται* από την ακτινοβολία στον αέρα ή στον ιστό, 3) την *ποσότητα ενέργειας που απορροφάται* από τον ιστό και 4) το τελικό αποτέλεσμα που εκφράζεται με *ισοδύναμο δόσης* (Πίνακας ΙΧ).

ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΧ. Οι διαδοχικές φάσεις της εκπομπής, της έκθεσης, της απορρόφησης και της επίπτωσης ιονιζουσών ακτινοβολιών

Περιγραφή Φάσης	Μονάδες μέτρησης/εκτίμησης
1) Δημιουργία ακτινοβολίας με πυρηνικό μετασχηματισμό ή άλλο τρόπο: Ενέργεια φωτονίων: $E = h \cdot \nu$ Ενέργεια σωματιδίων: $E = 1/2 m v^2$	Ενέργεια, E(ev), Συχνότητα, ν (Hz) Διασπάσεις/sec. (Ci και Bq) $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^9$ διασπάσεις/sec $1 \text{ Bq} = 1$ διάσπαση/sec = 60 dpm $1 \text{ Bq} = 2,7027 \cdot 10^{-11} \text{ Ci}$
2) Ενέργεια που μεταφέρεται στον αέρα ή στον ιστό. Εξαρτάται από ενέργεια φωτονίων ή σωματιδίων και από την πυκνότητά τους.	Έκθεση, Roentgen (r) Ρυθμός έκθεσης (r/hr) $1 \text{ r} = 2,58 \cdot 10^{-4}$ cb/kg αέρα Μετράται με Geiger ή άλλο μετρητή
3) Ενέργεια που απορροφά το βιολογικό σύστημα. Εξαρτάται από πυκνότητα μορίων συστήματος και ιδιότητες (μάζα, ταχύτητα, φορτίο) ακτινοβολίας	Γραμμική μεταβίβαση ενέργειας, LET (Kev/μm) Δόση Rad (100erg/gr) Gray (Gy) = 100rad = 1 joule/Kg
4) Βιολογικό αποτέλεσμα (αδρανοποίηση μορίων, διακοπή λειτουργίας κυττάρων). Εξαρτάται από – είδος-ιστού ή κυττάρων – μεταβολική κατάσταση, παρουσία οξυγόνου κ.λ.π. – φάση κυτταρικού κύκλου – ιδιότητες (μάζα, ταχύτητα, φορτίο, πυκνότητα) ακτινοβολίας = Q	Ισοδύναμη (ενεργή) δόση rem = Q·rad Sievert(Sv) = 100rem 1mSv = 100mrem

2.4.1. Ποσότητα ραδιενέργειας (Curie και Bequerel Ci, Bq)

Ορίζουμε τη Ραδιενέργεια σαν το ηλίκιο $\Delta N/\Delta E$ δηλαδή τον αριθμό διασπάσεων πυρήνων (ραδιονουκλιδίων) ανά δευτερόλεπτο. Μονάδα μετρήσεως είναι το *Κιουρί*

όπου $1 \text{ Ci} = 37 \cdot 10^9$ διασπάσεις/sec, με υπομονάδες,

$$1 \text{ mCi} = 37 \cdot 10^6 \text{ διασπάσεις/sec}$$

$$1 \text{ } \mu\text{Ci} = 37 \cdot 10^3 \text{ διασπάσεις/sec}$$

$$1 \text{ nCi} = 37 \text{ διασπάσεις/sec}$$

$$1 \text{ } \rho\text{Ci} = 37 \cdot 10^{-3} \text{ διασπάσεις/sec}$$

Τελευταία, σε αντικατάσταση της μονάδας Ci (που αντιπροσωπεύει τις διασπάσεις από 1 γραμμάριο ραδίου-226), χρησιμοποιείται η μονάδα *Μπεκερέλ* (Bq) όπου:

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ διάσπαση/sec δηλ. } 1 \text{ Ci} = 37 \cdot 10^9 \text{ Bq και}$$

$$1 \text{ mCi} = 37 \cdot 10^6 \text{ Bq, } 1 \mu\text{Ci} = 37 \cdot 10^3 \text{ Bq}$$

$$1 \text{ nCi} = 37 \text{ Bq, } 1 \rho\text{Ci} = 37 \cdot 10^{-3} \text{ Bq}$$

καθώς επίσης και $1 \text{ Bq} = 2,7027 \cdot 10^{-11} \text{ Ci}$

Τόσο το Bequerel (Bq) όσο και το Curie (Ci) με τις υποδιαιρέσεις του, δηλ. το मिलिकιουρί (mCi = 1/1.000 Ci) το μικροκιουρί ($\mu\text{Ci} = 1/1.000.000 \text{ Ci}$) κ.ά. δείχνουν τον *αριθμό διασπάσεων* ραδιενεργών πυρήνων ανά δευτερόλεπτο και μπορούν να αναφέρονται σε συγκεκριμένο όγκο (αέρα ή υγρού), π.χ. 10 Bq/λίτρο υγρού ή 10 Bq/κυβικό μέτρο αέρα. Όμως οι μονάδες αυτές δεν σημαίνουν τίποτα για την ενέργεια της ακτινοβολίας που αποδίδεται με κάθε διάσπαση (π.χ. Φωτόνια γ , σωματίδια β , σωματίδια α) που τελικά δείχνει και πόσο επικίνδυνες είναι για τα κύτταρα οι συγκεκριμένες διασπάσεις ραδιενεργών πυρήνων ανά δευτερόλεπτο.

Παραδείγματα:

1 Bq φυσικού ουρανίου (U) αντιστοιχεί με μία άλφα διάσπαση ανά δευτερόλεπτο (dps) δηλ. 0,489 dps U-238, 0,489 dps U-234 και 0,022 dps U-235.

1 Curie φυσικού ουρανίου αντιστοιχεί με $3,7 \cdot 10^{10}$ άλφα διασπάσεις ανά δευτερόλεπτο (disintegrations per second) δηλ. $1,81 \cdot 10^{10}$ dps U-238, $1,81 \cdot 10^{10}$ dps U-234 και $8,31 \cdot 10^8$ dps U-235.

ΧΡΟΝΟΣ ΥΠΟΔΙΠΛΑΣΙΑΣΜΟΥ

Ο αριθμός ατόμων που διασπάται στη μονάδα του χρόνου (dN/dt) είναι ανάλογος του αριθμού των ατόμων (N) δηλ.

$$\frac{dN}{dt} = -KN, \text{ όπου } K = \text{σταθερά διάσπασης}$$

Ολοκληρώνοντας στην παραπάνω εξίσωση για $t=0$ έως t έχουμε:

$$N = N_0 \cdot e^{-kt} \text{ (Νόμος των ραδιενεργών μετατροπών)}$$

Εάν τώρα ορίσουμε σαν χρόνο εκείνο κατά το οποίο παραμένει ο μισός αριθμός ατόμων δηλ. $N_0=2N$ τότε έχουμε:

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{2} = e^{-kT_{\frac{1}{2}}}$$

Ο χρόνος $T_{\frac{1}{2}}$ ονομάζεται *χρόνος υποδιπλασιασμού* (εικ. 32) και από αυτόν μπορεί να υπολογιστεί ο αριθμός των ατόμων που προκαλούν π.χ. 1.000.000 bq (δηλ. διασπάσεις/sec)

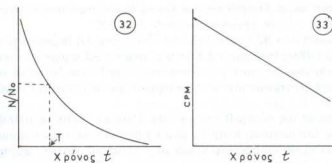
$$\frac{dN}{dt} = 1.000.000 = \frac{\ln 2 \cdot N}{T_{\frac{1}{2}}}$$

Εάν $T_{\frac{1}{2}} = 8$ μέρες (π.χ. για ιώδιο-134) δηλ. = 671.200 sec και $\ln 2 = 0,693$

$$\text{τότε } 1.000.000 = \frac{0,693 \cdot N}{671.200} \quad \text{και } N = \frac{10^6 \times 671,2 \times 10^3}{0,693}$$

άτομα = 968×10^9 άτομα

Η μέτρηση των «διασπάσεων ανά λεπτό» (dpm= disintegrations per minute) γίνεται με μετρητές (υγρού σπινθηριστού, Geiger-Muller, θάλαμο ιονισμού κ.ά.) που δείχνουν «κρούσεις ανά λεπτό» (Cpm = counts per minute) (εικ. 33). Ισχύει $Cpm = CE \cdot dpm$ όπου CE = αποδοτικότητα κρούσεων (Counting efficiency) και εξαρτάται από τη γεωμετρία του μετρητή, την απορροφητικότητα του υλικού (quenching) κ.α. Η τιμή του συντελεστή CE είναι πάντοτε $<1,0$.



Εικ. 32: Γραφική παράσταση της εξίσωσης $N = N_0 \cdot e^{-kt}$ που απεικονίζει τη μείωση του αριθμού ραδιονουκλιδίων σε συνάρτηση με το χρόνο. Όταν έχει μείνει η μισή ποσότητα τότε ο αντίστοιχος χρόνος T λέγεται «χρόνος φυσικού υποδιπλασιασμού» ή «φυσική ημιπερίοδος». Υπάρχει ακόμα η «βιολογική ημιπερίοδος» που παριστάνει το χρόνο που απαιτείται ώστε να αποβληθεί η μισή ποσότητα ραδιονουκλιδίων από τον οργανισμό: Π.χ. είναι 12 μέρες για το τρίτιο, 10 μέρες για άνθρακα-14, 135 μέρες για ιώδιο-131, 35 χρόνια για στρόντιο-90, 44 χρόνια για ράδιο-226.

Εικ. 33: Ελάττωση του ρυθμού «κρούσεων ανά λεπτό» (cprm) σε συνάρτηση με το χρόνο.

2.4.2. Μονάδα έκθεσης στην ακτινοβολία: Roentgen (R)

Για να εκφράσουμε ακριβώς την ποσότητα ενέργειας που προκαλείται από τις συγκεκριμένες διασπάσεις χρησιμοποιούμε τη μονάδα Roentgen (R). Ένα R εκφράζει τη ραδιενέργεια εκείνη που προκαλεί φόρτιση μιας μονάδας Ηλεκτροστατικού φορτίου/cm³ δηλ. $0,258 \times 10^{-3}$ Coulomb σε ένα κιλό αέρα = $5,4 \times 10^7$ Mev/gr αέρα.

Έτσι είναι πιθανό πως ραδιονουκλίδια με διαφορετικά Bq (διασπάσεις ραδιενεργών πυρήνων/δευτερόλεπτο) ελευθερώνουν την ίδια ενέργεια, με άλλα λόγια μπορούν να έχουν την ίδια επίπτωση στον άνθρωπο. Έτσι, η μονάδα R μετράει τη σχετική ένταση της ακτινοβολίας από ενεργειακή άποψη.

Θα πρέπει να τονίσουμε ακόμα ότι ενώ οι μονάδες Bq και Ci είναι *χαρακτηριστικά κάθε ραδιονουκλίδιου*, αντίθετα η μονάδα R μπορεί να εκφράζει *συνολική ενέργεια* που δέχεται ένας ιστός ή οργανισμός από μίγμα ραδιονουκλιδίων. Με άλλα λόγια τα Bq δεν προστίθενται (π.χ. 100 Bq Iωδίου-131 και 50 Bq καϊσίου-137 δεν κάνουν 150 Bq) ενώ αντίθετα τα R προστίθενται (Π.χ. 1 R Iωδίου-131 και 3R καϊσίου-137 κάνουν 4R συνολικής έκθεσης) αφού αυτά εκφράζουν συνολική ενέργεια. Πάντως, ίδιες ποσότητες R δεν προκαλούν το ίδιο βιολογικό αποτέλεσμα αφού αυτό εξαρτάται από πολλούς άλλους παράγοντες (π.χ. Πυκνότητα ιονισμού, μεταβολική κατάσταση του ιστού κ.λπ).

Ένας άλλος ορισμός είναι πως 1R εκφράζει τη δόση ακτίνων X,γ που προκαλεί ανά 0,001293 gr.αέρα τόσα ζευγάρια ιόντων, ώστε το φορτίο τους να είναι ίσο με μια ηλεκτροστατική μονάδα αρνητικού και μια θετικού ηλεκτρισμού. Αυτό αντιστοιχεί περίπου με παραγωγή $2,1 \times 10^9$ ζευγαριών ιόντων. Δεδομένου, ότι τα 0,001293 gr αέρα (σε θερμοκρασία 0°C και πίεση 760 mm Hg) αντιστοιχούν σε 1 cm³, αυτό σημαίνει πως 1 R προκαλεί τον σχηματισμό $2,1 \times 10^9$ ζευγάρια ιόντων σε κάθε cm³ αέρα. Ο αριθμός των ζευγαριών ιόντων που σχηματίζονται σε υδρατμούς από 1 r είναι μεγαλύτερος από $2,1 \times 10^9$.

Ακόμα, αφού $1W = 32,5\text{ev} = 5,2 \times 10^{-11}\text{erg}$ τότε 1R παριστάνει απορρόφηση ενέργειας $0,107\text{erg/cm}^3$ αέρα ή 85erg/gr αέρα ή 93 erg/gr νερού ή ιστού. Οι αριθμοί αυτοί ισχύουν απόλυτα μόνο στα αέρια γιατί είναι δύσκολο να μετρηθεί άμεσα ο αριθμός ζευγαριών ιόντων που σχηματίζονται μέσα στα υγρά ή τα στερεά.

Ο υπολογισμός της δόσης R στις ακτίνες X και γ, γίνεται με μεθόδους φυσικής και χημικής, δοσιμετρίας. Κατά τη φυσική δοσιμετρία, ένας συμπυκνωτής (με μαζικό συντελεστή απορρόφησης όμοιο με του αέρα), αρχικά φορτισμένος με γνωστό φορτίο, αφήνεται να εκφορτιστεί οπότε ο βαθμός απορρόφησης (που διαβάζεται σε κλίμακα) αποτελεί το μέτρο της δόσης σε roentgen. Κατά τη χημική δοσιμετρία χρησιμοποιείται η μέθοδος του Miller (οξειδωση του θειϊκού σιδήρου), που είναι κατάλληλη για ακτίνες X, γ με ενέργεια πάνω από 50 kev. Το δοσίμετρο θειϊκού σιδήρου στηρίζεται στην πειραματική διαπίστωση πως 6,5 άτομα σιδήρου οξειδώνονται για κάθε ζευγάρι σχηματιζομένων ιόντων, δηλ. 20 άτομα Fe για κάθε 100 ev ενέργειας που απορροφήθηκε.

Πολύ συχνά αναφέρεται η μονάδα *ρυθμός έκθεσης* (R/hr ή mR/hr ή μR/hr) π.χ. σε ραδιενέργεια περιβάλλοντος (βλέπε κεφ. 2.6). Αντίθετα σε «εφ'άπαξ» εκθέσεις όπως σε μια ακτινογραφία αναφερόμαστε σε συνολική έκθεση (π.χ. 30mR).

Ο ρυθμός έκθεσης για φωτόνια ενεργειών 0,07 μέχρι 4 Mev μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση (με ένα σφάλμα 20%):

$$\text{Ρυθμός έκθεσης σε mR/hr} = \frac{5.000 \cdot C \cdot E \cdot F}{d^2}$$

- όπου C: συγκέντρωση πηγής σε m Ci
 E: η ενέργεια των φωτονίων
 F: το ποσοστό % των φωτονίων αυτών
 d: η απόσταση σε cm

Παράδειγμα: Με πόσα ζεύγη ιόντων ανά cm^3 και δευτερόλεπτο αντιστοιχεί ρυθμός έκθεσης $1\mu\text{R/hr}$ (η τιμή αυτή αντιστοιχεί με τη χαμηλότερη φυσική ακτινοβολία).

Επειδή 1R προκαλεί το σχηματισμό $2,1 \cdot 10^9$ ζευγαριών ιόντων/ cm^3 αέρα θα είναι: $1\mu\text{R} = 2,1 \cdot 10^9 \cdot 10^{-6} = 2.100 \text{ ζεύγη/cm}^3$.
 Η έκθεση αυτή, για 1 δευτερόλεπτο θα είναι $2.100/3.600 = 0,58$. Δηλ. $1\mu\text{R/hr} = 0,58$ ζευγαρία ιόντων/ $\text{cm}^3 \cdot \text{sec}$.

2.4.3. Μονάδα απορρόφησης, rad (radiation absorbed dose) και Gray (Gy)

Η μονάδα rad προτάθηκε για να εκφράσει εκείνη την έκθεση σε ακτινοβολία που συνεπάγεται απορρόφηση ενέργειας 100 erg/gr ακτινοβολούμενου ιστού ή $62,5 \times 10^9 \text{Mev/gr}$. Η μονάδα Gray (από το όνομα ερευνητή-πρωτοπόρου στην Ακτινοφυσική) αντιστοιχεί με 100 rad και εκφράζει απορρόφηση ενέργειας 1 joule/Kg.

Για «συνηθισμένες» ακτίνες X και γ, η δόση σε R που προσβάλλει τον ιστό αντιστοιχεί με εκείνη που απορροφάται. Αν όμως μια ακτινοβολία έχει π.χ. πολύ μεγάλη ενέργεια (μεγάλο R) δηλ. μεγάλη διεισδυτικότητα τότε είναι πολύ πιθανό ότι θα περάσει γρήγορα από τον ιστό και έτσι η απορροφητικότητα θα είναι πολύ μικρότερη (χαμηλή rad ή Gy). Αντίθετα σωματίδια α με μικρό R απορροφώνται πάρα πολύ γιατί έχουν μεγάλη μάζα. Βλέπουμε λοιπόν ότι για ακραίες περιπτώσεις η απορροφούμενη δόση δεν είναι ανάλογη με την προσπίπτουσα ενέργεια.

Το rad εφαρμόζεται σε όλες τις ακτινοβολίες, συμπεριλαμβανομένων και των νετρονίων τα οποία ανιχνεύονται από τους ιονισμούς που προκαλούν τα δημιουργούμενα πρωτόνια. Πάντως, πρέπει να τονίσουμε πως οι ισχύουσες μονάδες δόσεων δεν εκφράζουν ικανοποιητικά τη δράση των νετρονίων γιατί ο αριθμός πρωτονίων που υπάρχουν π.χ. σε 1 γρ. νερό είναι πολύ μεγαλύτερος από εκείνον σε 1 γρ. αέρα. Αυτό έχει σαν συνέπεια πως η σχέση απορροφούμενης ενέργειας για τα δύο αυτά υλικά είναι περίπου 10 για τα νετρόνια και μόλις 1,2 για τις άλλες ακτινοβολίες.

Για τις ακτίνες X, 1 rad είναι ίσο με το ποσό ενέργειας που ελευθερώνεται στο νερό από 1,08 roentgen.

Αν γνωρίζουμε την ενέργεια των εκπεμπόμενων ακτινοβολιών τότε μπορούμε να υπολογίσουμε τη δόση ακτινοβολίας που δέχεται το ακτινοβολούμενο υλικό διαιρώντας την ενέργεια αυτή, με τη μάζα. Π.χ. 1 curie ισotόπου που εκπέμπει ακτίνες β μέσης ενέργειας 1 MeV, διαλυμένο σε 1 λίτρο νερό (ή διασπειρόμενο σε 1 λίτρο ιστών), θα προκαλέσει απορρόφηση:

$$\frac{3,7 \times 10^{10} \times 1 \times 10^6}{1000} \text{ eV/gr.sec, δηλ. } 0,6 \text{ rad/sec}$$

(αφού 1 rad = $62,5 \cdot 10^6$ MeV).

Για τον υπολογισμό αυτό δεχόμαστε ότι η ενέργεια των ακτίνων β καταναλώνεται εξ ολοκλήρου μέσα στο διαλυτικό μέσο. Με την προϋπόθεση αυτή, η δόση D (σε rad) που δέχεται ένα σώμα κάθε μέρα (1440 min) θα είναι: $D=53$ CE, όπου C είναι η συγκέντρωση του ισotόπου σε microcurie/gr, και E είναι η ενέργεια της ακτινοβολίας σε MeV. Αν όμως, ο όγκος του υλικού μέσα στον οποίο διεσπάρει η ραδιενεργή ουσία, είναι μικρός, τότε η παραπάνω υπόθεση δεν ευσταθεί γιατί η δράση των ακτινοβολιών μπορεί να εκτείνεται πέρα από τον δεδομένο όγκο.

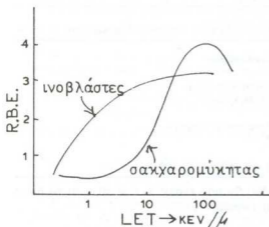
Για τις ακτίνες γ, που η διεισδυτικότητά τους είναι πολύ μεγαλύτερη από τις ακτίνες β, ο υπολογισμός της δόσης γίνεται με διαφορετικό τρόπο. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε την σταθερά (k) του Magneord. Η σταθερά k εκφράζει τη δόση σε r/ώρα, των ακτίνων γ που εκπέμπονται από 1 millicurie ραδιενεργού ουσίας σε απόσταση 1 cm στον αέρα. Η τιμή της σταθεράς εξαρτάται από την ενέργεια των εκπεμπόμενων ακτίνων γ. Ακόμα, πρέπει να τονιστεί, πως πολλές πηγές ακτινοβολίας εκπέμπουν τόσο ακτίνες γ όσο και ακτίνες β, έτσι που για τον υπολογισμό της ολικής δόσης πρέπει να ληφθούν υπ'όψη και οι δύο.

Το ερώτημα είναι τώρα πόση από την απορροφούμενη δόση επιφέρει βιολογικό αποτέλεσμα. Το τελευταίο και πάλι εξαρτάται από το είδος (την ποιότητα) της ακτινοβολίας αλλά και το είδος (π.χ. νερά κύτταρα ή γερασμένα) του ιστού. Εκφράζεται σε rem (rad equivalent man) ή Sv (από το όνομα του πρωτοπόρου στην Ακτινοφυσική Rolf Sievert).

2.4.4. Μονάδα ισοδύναμης δόσης (rem, Sievert)

Μετά την απορρόφηση της ακτινοβολίας από τον συγκεκριμένο ιστό ή οργανισμό αυτό που τώρα ενδιαφέρει και που έχει, από Ραδιοβιολογική άποψη, τη μεγαλύτερη σημασία είναι το βιολογικό αποτέλεσμα δηλαδή οι επιπτώσεις στο Μοριακό, στο Κυτταρικό και στο Οργανισμικό επίπεδο (βλ. πίνακα IX). Αν και το φαινόμενο των βιολογικών επιπτώσεων της ακτινοβολίας είναι κυρίως ποιοτικό (με εξαίρεση τις ποσοτικές μετρήσεις θνησιμότητας, θραύσεις χρωμοσωμάτων κ.ά.), εν τούτοις έχει επικρατήσει η αριθμητική απόδοση με τη μονάδα rem (roentgen equivalent man - ισοδύναμο δόσης roentgen για τον άνθρωπο) η οποία για τις περισσότερες περιπτώσεις (ακτίνες-X, γ και ηλεκτρόνια μικρής

ενέργειας) ισοδυναμεί με το rad, δηλ. απορρόφηση 1 rad προκαλεί βιολογικό αποτέλεσμα 1 rem ή πράγμα που είναι το ίδιο, απορρόφηση 1 Gray προκαλεί βιολογικό αποτέλεσμα 1 Sv αφού 1 Sv = 100 rem και 1 Gray = 100 rad). Σε άλλες όμως περιπτώσεις, όπως π.χ σε νετρόνια, η απορρόφηση 1 rad δεν προκαλεί βιολογικό αποτέλεσμα 1 rem αλλά μεγαλύτερο. Π.χ. νετρόνια ενέργειας 1 Mev προκαλούν «δεκαπλάσιο βιολογικό αποτέλεσμα» από ό,τι ίδιας ενέργειας σωματίδια-β ή ακτίνες X ή ακτίνες-γ (πίνακας X). Μιλάμε τότε για «σχετική βιολογική επίπτωση» (relative Biological Effectiveness) που είναι καθαρός αριθμός και συμβολίζεται με Q (ονομάζεται και «συντελεστής ποιότητας») (εικ. 34). Είναι βέβαια λογικό να υποθέσει κανείς ότι σημαντικό ρόλο στην εύρεση της τιμής του συντελεστή Q, θα πρέπει να παίζει η «γραμμική μεταβίβαση ενέργειας» (LET), όπως και πράγματι συμβαίνει (πίνακας XI).



Εικ. 34. Μεταβολή της «σχετικής βιολογικής επίπτωσης» (R.B.E.) με τη «γραμμική μεταβίβαση ενέργειας» (LET).

Κατά συνέπεια, το rem (και το Sv) μετράει το βιολογικό αποτέλεσμα μιας ακτινοβολίας σε συγκεκριμένο ιστό ή σε ολόκληρο το σώμα. Π.χ. μια ακτινοβολία μπορεί να παρέχει *ισοδύναμο δόσης* 1 rem στο θυρεοειδή και 0,5 rem στο υπόλοιπο σώμα. Οι δύο αυτές δόσεις δεν αθροίζονται γιατί είναι διαφορετικά τα επιτρεπόμενα όρια δόσεων για το θυρεοειδή από ότι είναι για ολόκληρο το σώμα (π.χ. ο θυρεοειδής μπορεί να δεχθεί 13 rem ιωδίου-131 κατά τη γνωστή εξέταση καλής λειτουργίας του χωρίς επιπλοκές, ενώ η ίδια δόση αν δοθεί σε ολόκληρο το σώμα είναι σίγουρα επικίνδυνη (όχι όμως θανατηφόρα). Η σχέση ανάμεσα σε rem και σε bq μπορεί να βρεθεί αν γνωρίζουμε τη διαδικασία απορρόφησης των ραδιονουκλιδίων από τον συγκεκριμένο ιστό και την ευαισθησία του στην εκπεμπόμενη ακτινοβολία. Έτσι γίνεται ο καθορισμός ορίων ασφαλείας (Π.χ. 1000 bq/λίτρο) για κάποιο ραδιονουκλίδιο σε μια τροφή (π.χ. ιώδιο-131 στο γάλα).

ΠΙΝΑΚΑΣ X. Τιμές συντελεστή «σχετικής βιολογικής επίπτωσης» για διάφορες ακτινοβολίες
 Ισχύει: $rem=Q \cdot rad$ και $Sv=Q \cdot Gy$

Ακτινοβολία	Ενέργεια	Συντελεστής Q
Χ, γ, β	μέχρι 5 Mev	1
σωματίδια-α	μέχρι 1 Mev	10-20
Νετρόνια	$2,5 \cdot 10^{-8}$ Mev (θερμικά)	2-3
	10^{-7} μέχρι 10^{-2} Mev	2
	$5 \cdot 10^{-2}$ Mev	5-7
	10^{-1} Mev	11
	5 Mev	6-8
	50 Mev- 10^3 Mev	3
Πρωτόνια	2-1000 Mev	1-2

ΠΙΝΑΚΑΣ XI. Συσχέτιση LET και Q ως προς είδος ακτινοβολίας (το LET αναφέρεται σε νερό)

LET (Kev/μ)	Q/Ακτινοβολία
$\leq 3,5$	1 Ακτίνες X και γ
7	2 ή ηλεκτρόνια
23	5 πρωτόνια, νετρόνια
53	10
≥ 175	20 σωματίδια-α και βαρείς πυρήνες

Τέλος, υπάρχει ακόμα η μονάδα Man-Sv που εκφράζει την αθροιστική δόση αριθμού εκτιθέντων στην ακτινοβολία ανθρώπων.

Αντιστοιχίες

- Τα σωματίδια-β ελευθερώνουν ενέργεια ~ 2 Mev/Cm βάθους ιστού (είναι προφανές ότι όταν η ενέργεια είναι π.χ. 1 Mev το βάθος διείσδυσης είναι 0,5 cm).
- 100 σωματίδια-β/cm²·sec προσδίδουν ισοδύναμη δόση 10mgem/ώρα σε ακτινοβολία δέρματος.
- Οι ακτίνες-γ χάνουν περίπου 3% της ενέργειάς τους σε κάθε cm βάθους ιστού.
- Ο ισοδύναμος ρυθμός έκθεσης από φωτόνια ενέργειας E (σε Mev) που προέρχονται από πηγή ενεργότητας A εκπέμποντας κλάσμα f διασπάσεων, σε απόσταση d (σε πόδες) είναι $6fAE/d^2$ (mR/ώρα).
- 1 rad = $62,5 \times 10^6$ Mev/gr (=100 ergs/gr) απορρ. δόση.

Παράδειγμα: Απορρόφηση 1.000.000 φωτονίων με ενέργεια 0,09 Mev το καθένα, σε 10 γραμμάρια ιστού, προκαλεί απορροφούμενη δόση

$$\frac{10^6 \times 0,09 \text{ Mev}}{10 \text{ gr} \times 62,5 \times 10^6 \text{ MeV/gr-Rad}} = 0,144 \text{ mRad}$$

Η τιμή αυτή είναι περίπου δεκαπλάσια της δόσης που δεχόμαστε από ακτινοβολήση φυσικών ραδιενεργών στοιχείων/ώρα

Συντελεστές μετατροπής

Πλουτώνιο-239	238 rem/ μ Ci=6,4 mrem/Bq
Ιώδιο-131	2 rem/ μ Ci=0,05mrem/Bq
Στρόνιο-89+90	0,5 rem/ μ Ci = 0,0135 mrem/Bq
Καίσιο 137+134	0,065 rem/ μ Ci = $1,75 \times 10^{-3}$ mrem/Bq
ή Καίσιο-137: $1,3 \times 10^{-3}$ mrem/Bq για ενήλικες και $2,7 \times 10^{-3}$ για παιδιά	
Καίσιο-134: 2×10^{-3} mrem/Bq για ενήλικες και $3,6 \times 10^{-3}$ για παιδιά	

Παραδείγματα:

1) Ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας ~2MeV χάνουν ενέργεια μέσα στο κυτταρόπλασμα με LET = 2 MeV/cm. Να υπολογιστεί ο ρυθμός δόσης αν σε επιφάνεια 1 cm² προσπίπτουν 100 σωματίδια-β/sec.

Θεωρώντας την πυκνότητα = 1 έχουμε πως 1 cm³ = 1 gr.

Έτσι τα 100 σωματίδια-β δίνουν ενέργεια 100×2 = 200 MeV και επειδή 1 mRad = 62.500 MeV/gr έχουμε ρυθμό δόσης=

$$\frac{200 \text{ MeV/gr}\cdot\text{sec}}{62.500 \text{ MeV/gr}\cdot\text{mrad}} = 0.0032 \text{ mRad/sec}$$

2) Ένας χρήσιμος κανόνας είναι πως από 100 σωματίδια-β υψηλής ενέργειας ανά cm² και sec προκαλείται ρυθμός δόσης 10mrem/hr. Επίσης ισχύει πως ο ρυθμός δόσης (σε mrad/hr)=

$$\frac{338.000 \times \text{ραδιενέργεια (σε mCi)}}{\text{απόσταση}^2(\text{σε cm})} \text{ (για φωσφόρο-32)}$$

Π.χ. σε απόσταση 10cm από δοχείο που περιέχει 100 μ Ci φωσφόρου-32 ο ρυθμός δόσης είναι

$$\frac{338.000 \times 0,1}{10^2} = 338 \text{ mrad/hr}$$

3) Ποιάς είναι ο ρυθμός δόσης (σε rad/ώρα) στην επιφάνεια του δέρματος, αν πέσει μία σταγόνα ραδιενεργού διαλύματος ειδικής ενεργότητας (specific activity) 0,1 m Ci/ml.

Αν δεχθούμε ότι μία σταγόνα έχει όγκο 0,05 ml, τότε αυτή περιέχει 5 μ Ci ραδιενέργειας που αντιπροσωπεύουν $3,7 \cdot 10^{10} \times 5 \cdot 10^{-6}$ διασπάσεις/sec = $11,1 \cdot 10^5$ διασπάσεις/min. Αν η σταγόνα απλωθεί σε 1 cm² επάνω στο δέρμα και αφού για κάθε 100 σωματίδια-β/cm²·sec έχουμε ισοδύναμη δόση 10mrad (βλέπε παράδ. 2) τότε η απορροφούμενη δόση θα είναι:

$$10 \frac{5,5 \cdot 10^6}{60 \cdot 100} \text{ mrad/hr} = 9 \text{ rad/hr} \text{ (όταν δεχθούμε ότι τα 50% ακτινοβολεί προς το δέρμα)}$$

4) Ιώδιο-131 δίνεται σε ασθενή (ποσότητα 10 μ Ci) και 30% από αυτό συσσωρεύεται στον θυροειδή μάζας 20gr. Ποιά είναι η ισοδύναμη δόση που δέχεται ο ιστός από τα σωματίδια-β; Αυτά έχουν μέση ενέργεια 0,188 MeV.

Από τα 100 μ Ci, τα 30 μ Ci συσσωρεύονται στον αδένα.

$$\text{Η ενέργεια που αποτίθεται είναι } 30\mu\text{Ci} \times \frac{3,7 \times 10^4 \text{ διασπ.}}{\mu\text{Ci}\cdot\text{sec}} \times \frac{0,188 \text{ MeV}}{\text{διασπ.}} = 2,09 \times 10^5 \text{ MeV/sec}$$

Ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης είναι

$$\frac{2,09 \times 10^5 \text{ MeV}}{20\text{gr}\cdot\text{sec}} \times \frac{3600 \text{ sec}}{\text{hr}} \times \frac{1 \text{ mrad}\cdot\text{gr}}{62.500 \text{ MeV}} = 600 \frac{\text{mrad}}{\text{hr}}$$

Ο μέσος χρόνος που παραμένει το ιώδιο-131 στον θυρεοειδή είναι περίπου 10 μέρες και κατά συνέπεια η αληθινή δόση θα είναι $600 \text{ mrad/hr} \times 10 \times 24 = 144 \text{ rads}$.

Επιπλέον ένα ποσοστό δόσης 10% προστίθεται από την ακτινοβολία γ των ραδιονουκλιδίων του ιωδίου-131.

5) Το ιώδιο-131 εκπέμπει φωτόνια- γ δύο ενεργειών: 0,36 MeV (ποσοστό 87%) και 0,64 MeV (ποσοστό 9%). Ποιός είναι ο ρυθμός έκθεσης σε απόσταση 50 cm από πηγή 10mCi.

Έχουμε $E_1 = 0,36 \text{ MeV}$ με $f_1 = 0,87$ και

$E_2 = 0,64 \text{ MeV}$ με $f_2 = 0,09$

Ο ρυθμός έκθεσης από τα φωτόνια E_1 θα είναι:

$$\frac{50 \cdot 10^2 C E_1 f_1}{d^2} \quad (\text{σε mR/hr})$$

όπου C: η ενεργότητα της πηγής σε mCi f: το κλάσμα % των φωτονίων

E_1 : η ενέργεια των φωτονίων

d: η απόσταση σε cm

$$\text{δηλ. } \frac{5.000 \times 10 \times 0,36 \times 0,87}{2.500} = 6,26 \text{ mR/hr}$$

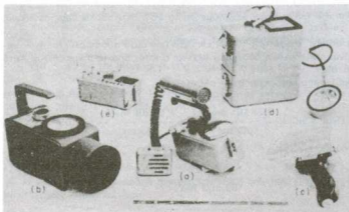
Ο ρυθμός έκθεσης για τα φωτόνια E_2 θα είναι αντίστοιχα:

$$\frac{5.000 \times 10 \times 0,64 \times 0,09}{2.500} = 1,15 \text{ mR/ώρα}$$

Έτσι ο ολικός ρυθμός έκθεσης είναι $6,26 + 1,15 = 7,41 \text{ mR/hr}$ που αντιστοιχεί με ρυθμό δόσης $7,41 \text{ mrad/hr}$.

Κεφ. 2.5. Τρόποι ανίχνευσης της ιονίζουσας ακτινοβολίας

Επειδή τα ραδιενεργά άτομα εκπέμπουν ακτινοβολία κυρίως με τη μορφή σωματιών β (ηλεκτρονίων), σωματιδίων α (δηλ. δύο πρωτονίων p και δύο νετρονίων n) καθώς και με τη μορφή ακτίνων γ , γι' αυτό η ανίχνευσή της πρέπει να περιλαμβάνει ανάλογα ευαίσθητα όργανα. Δυστυχώς ο ανθρώπινος οργανισμός δεν έχει την ικανότητα να ανιχνεύσει έγκαιρα την ύπαρξη ραδιενέργειας που τον προσβάλλει παρά μόνο όταν είναι ήδη πολύ αργά δηλ. μετά την εκδήλωση των συμπτωμάτων. Αντίθετα έχουν κατασκευασθεί ευαίσθητα όργανα (φορητά ή μόνιμα) (εικ. 35) που έχουν τη δυνατότητα αυτής της ανίχνευσης:



Εικ. 35: Διάφορα όργανα μέτρησης της ακτινοβολίας που προκαλείται από τη ραδιενέργεια νουκλιδίων. a,c) Μετρητής Geiger Mueller b) Θάλαμος ιονισμού, d) Αναλογικός μετρητής με ροή αερίου, e) μετρητής παλιών.

2.5.1. Θάλαμος ιονισμού (ionization chamber).

Πρόκειται για μεταλλικό θάλαμο (εικ. 36), με δύο ηλεκτρόδια και υψηλή τάση. Ιονισμός που προκαλείται από ιονίζον σωματίδιο ή φωτόνιο, δημιουργεί μικρό ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο ενισχυόμενο κατάλληλα μπορεί να δώσει πληροφορίες για τον αριθμό των ιονιζόντων σωματιδίων (ή φωτονίων) (οπότε καλείται απαριθμητής - counter) αλλά και για την ενέργειά τους.

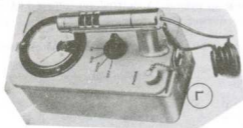
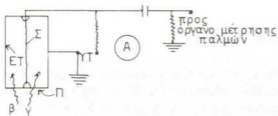


Εικ. 36: Θάλαμος ιονισμού όπου τα πρωτογενή ηλεκτρόνια και τα ιόντα που σχηματίστηκαν προκαλούν παλμό ανάλογα με την ενέργεια. Π.χ. για φωτόνιο ενέργειας 1 Mev ο αριθμός ζευγαριών ιόντων είναι περίπου 1.000.000 εν/30 εν = 33.000.

Το εικονιζόμενο όργανο διαθέτει μικροεπεξεργαστή CMOS και σθόνη υγρού κρυστάλλου με 101 υποδιαίρεσεις. Οι τιμές δίνονται σε mR/ώρα ή σε $\mu\text{Sv/ώρα}$. Γίνονται αντιληπτά σωματίδια- α (μεγάλου ειδικού ιονισμού), σωματίδια- β με ενέργεια μεγαλύτερη των 100 KeV και φωτόνια- γ με ενέργεια μεγαλύτερη από 7 KeV. Ο θάλαμος έχει χωρητικότητα 200 cc.

2.5.2. Μετρητής Geiger Mueller (G - M counter)

Αποτελείται από σωλήνα (λυχνία) διαστάσεων συνήθως 3×10 cm και ηλεκτρονικό σύστημα μέτρησης (εικ. 37). Η λυχνία περιέχει αέριο (συνήθως He, Ne, ή Ar) και με τη βοήθεια υψηλής τάσης ανάμεσα σε τετρωμένο σύρμα και στα τοιχώματα της λυχνίας εντοπίζει τη διέλευση σωματιδίου - β : το αποτέλεσμα δίνεται με οπτική ή/και ηχητική μορφή.



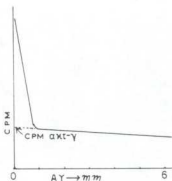
Εικ. 37. Α: Διαγραμματική απόδοση του κυκλώματος ενός μετρητή Geiger-Mueller (G-M counter). Πρόκειται για όργανο **ποσοτικής** μέτρησης της ραδιενέργειας. Περιλαμβάνει: 1) Λυχνία αερίου (συνήθως He, Ne, Ar) με διαστάσεις περίπου $3,5 \times 10$ cm, αγωγίμο εσωτερικό τοίχωμα (Ε.Τ.), παράθυρο (Π) πυκνότητας ~ 2 mg/cm² (για σωματίδια-β), λεπτό σύρμα (Σ) στο κέντρο της λυχνίας. 2) Υψηλή τάση (ΥΤ) ~ 1.200 volts που εφαρμόζεται μεταξύ σύρματος (+) και αγωγίμου εσωτερικού τοιχώματος (-) 3) Διάταξη μετρήσεως παλμών με οπτική και ακουστική παρουσίαση της ραδιενέργειας.

Β: Τυπικός μετρητής G-M με δυνατότητα μέτρησης ρυθμού εκθέσεων από 0,01 mR/ώρα μέχρι 1 R/ώρα και δυνατότητα ηχητικής παρουσίασης των κρούσεων (μέχρι 10^6 cpm).

Γ: Μετρητής G-M με δυνατότητα διαχωρισμού σωματιδίων-β (πάνω από 175 Kev) και φωτονίων-γ (ιδανικός για ανίχνευση ιωδίου-131 και φωσφόρου-32) με τη βοήθεια κινητού κλείστρου. Έχει τρεις κλίμακες με μέγιστο 0,5 mR/ώρα, 5 mR/ώρα και 50 mR/ώρα (300, 3.000 και 30.000 cpm αντίστοιχα).

Η διαδικασία περιλαμβάνει είσοδο σωματιδίου β μέσα στη λυχνία και σύγκρουσή του με τα ηλεκτρόνια του ατόμου του αερίου της λυχνίας. Τα εκδιωκόμενα ηλεκτρόνια έλκονται προς το σύρμα με το θετικό υψηλό δυναμικό και στη διαδρομή τους συγκρούονται με άλλα άτομα του αερίου, κ.ο.κ. Παράγεται έτσι με διαδικασία χιονοστιβάδας (avalanche) στιγμιαίο ηλεκτρικό ρεύμα. Ο μετρητής αυτός συνήθως ανιχνεύει σωματίδια -β αλλά με ειδική τεχνική μπορεί να εντοπίσει και ακτινοβολία -γ(εικ. 38). Οι τιμές δίνονται σε ιονισμούς ανά δευτερόλεπτο και επειδή το μέγεθος της λυχνίας του οργάνου είναι γνωστό μπορούμε να έχουμε την τιμή σε R δηλ. σε αριθμούς ιονισμών/cm³ αέρα (υποδιαίρεση των $R = \text{roentgen}$ είναι το μr δηλ. $1 \mu R = 10^{-6} R$ που αντιστοιχεί με παραγωγή $2,1 \cdot 10^3$ ζευγάρια ιόντων/cm³ αέρα).

Με τη βοήθεια του μετρητή Gieger-Müller μπορεί να ανιχνευθεί η παρουσία αυξημένης ραδιενέργειας στην ατμόσφαιρα, καθώς και σε διάφορα αντικείμενα (π.χ. ρούχα, φαγώσιμα, κ.λπ.). Η μέτρηση για υγρά είναι δύσκολη γιατί θα πρέπει η λυχνία του μετρητή να εμβαπτισθεί με αδιάβροχο τρόπο μέσα στο υγρό. Αντίθετα, οι μετρήσεις υγρών αλλά και στερεών ουσιών γίνεται με άλλα όργανα,



Εικ. 38: Διαχωρισμός μέτρησης σωματιδίων-β από φωτόνια-γ με τη βοήθεια απορροφητικού υλικού (AY) στο «παράθυρο» του μετρητή G-M. Η καμπύλη δείχνει τη σχέση του πάχους του AY με τις τιμές cpm.

τους μετρητές σπινθηρισμού (βλ. παρακάτω). Έτσι η χρήση του μετρητή G-M περιορίζεται κυρίως στην ανίχνευση ραδιενέργειας χώρου (εικ. 39) αλλά και πιθανά μολυσμένων επιφανειών (εικ. 40) ή χειριών (εικ. 41). Η χρήση ακόμα «προσωπικών» μετρητών (εικ. 42) είναι πολύ διαδεδομένη σε εργαζόμενους με ραδιοϊσότοπα.

Χαρακτηριστικά: 1) Ο μετρητής G-M είναι όργανο μέτρησης αριθμού σωματιδίων δηλ. δεν μπορεί να διακρίνει σωματίδια -β (ή φωτόνια -γ) διαφορετικών ενεργειών αφού την ίδια στιγμή κάθε ένα σωματίδιο (ή φωτόνιο) δίνει ένα παλμό.

Η τιμή του R που μετράει ένα όργανο (δηλ. η συνολική ενέργεια της ακτινοβολίας) δεν μας δίνει πληροφορίες για το είδος των ραδιονουκλιδίων. Πρόκειται συνεπώς για ποσοτική και όχι για ποιοτική έκφραση της ραδιενέργειας. Η ποιοτική έκφραση μπορεί να βρεθεί μόνο με ειδική ανίχνευση ραδιονουκλιδίων. Είναι κατά συνέπεια παραπλανητική, ως προς τα βιολογικά αποτελέσματα, η αντίληψη ότι αύξηση ή ελάττωση του ρυθμού έκθεσης του περιβάλλοντος (σε R) σημαίνει και μεγαλύτερο ή μικρότερο αντίστοιχα, βιολογικό κίνδυνο. Αυτό που χρειάζεται πάντα είναι η γνώση της ποιότητας της ραδιομόλυνσης.

2) Η προσθήκη «παράθυρου» μεγαλύτερου πάχους π.χ. 2mm αλουμίνιο ανακόπτει τη διέλευση των β - σωματιδίων και έτσι οι όποιες μετρήσεις εμφανίζονται σε κρούσεις/λεπτό (cpm) αντιπροσωπεύουν φωτόνια ακτίνων -γ, τα οποία μπορούν να διαπερνούν ακόμα και το τοίχωμα της λυχνίας (βλ. εικ.38).

3) Σε πολύ μεγάλο αριθμό σωματιδίων δεν προλαβαίνει η λυχνία να αποφορτιστεί και έτσι το όργανο δείχνει μηδέν κρούσεις/λεπτό.

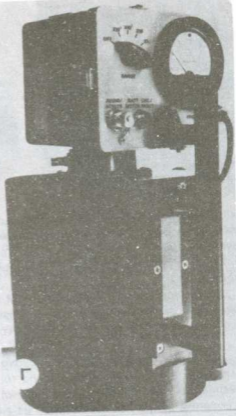
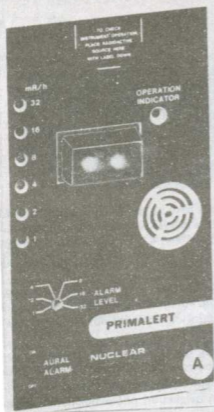
4) Μπορεί να γίνει εκτίμηση αριθμού διασπάσεων/λεπτό (dpm - disintegrations per minute) αν χρησιμοποιηθεί πρότυπο ραδιοϊσότοπο με γνωστό ρυθμό

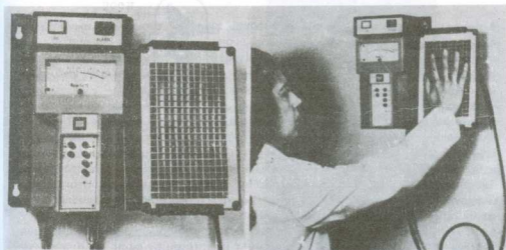
Εικ. 39: Μετρητές για ανίχνευση της ραδιενέργειας χώρου.

A: G-M μετρητής με ενδεικτικές λυχνίες προειδοποίησης για διάφορους ρυθμούς έκθεσης.

B: Όργανο με λογαριθμική κλίμακα 0,1 mR/h μέχρι 100 mR/h (μετρητής G-M).

Γ: Όργανο που ανιχνεύει την παρουσία νετρονίων από λίγα εν μέχρι 1 Μεν, με τη βοήθεια θαλάμου υδραργύρου και BF₃.





Εικ. 40,41: Μετρητής με αέριο ξενον που ανιχνεύει φωτόνια- γ , φωτόνια- X και σωματίδια- β (ενέργεια μεγαλύτερη από 150 Kev) σε μολυσμένες επιφάνειες και σε χέρια (ευαισθησία $10^5 \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$).



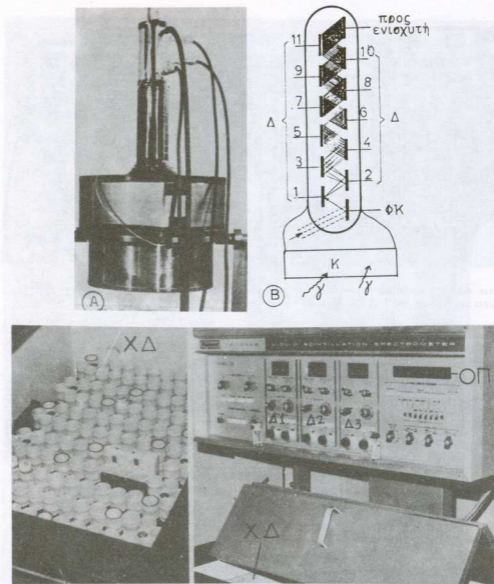
Εικ. 42: Προσωπικοί μετρητές-δοσίμετρα που δείχνουν την ολική συσσωρευμένη έκθεση σε ακτινοβολία φωτονίων ενέργειας 30 Kev μέχρι 2 Men (θάλαμοι ιονισμού).

dpm, οπότε με απλή αναλογία βρίσκονται τα dpm της άγνωστης ραδιενέργειας.

Ο μετρητής G-M μετράει ένα μικρό μόνο κλάσμα από τα σωματίδια που εκπέμπονται από τη ραδιενεργή ουσία. Ο λόγος των κρούσεων/min (cpm) που δείχνει ο μετρητής προς το ρυθμό σωματιδίων που εκπέμπει η ουσία (dpm) ονομάζεται «αποδοτικότητα του μετρητή» (counter efficiency) και εξαρτάται τόσο από την κατασκευή της λυχνίας του μετρητή (διάμετρος παραθύρου, κ.λπ.) όσο και από τη διασπορά των σωματιδίων στο χώρο: Αποδοτικότητα = cpm/dpm.

2.5.3. Μετρητές με σπινθηρισμό (Scintillation counters)

Αναπτύχθηκαν από τον Η.Ο. Anger στα 1955 και χρησιμοποιούν σαν μέσο ανίχνευσης φωτονίων κρυστάλλους ιωδιούχου νατρίου ενεργοποιούμενους με θάλιο δηλ. NaI (Tl). Η εκπομπή φωτοηλεκτρονίων από τα άτομα του κρυστάλλου ενισχύεται με φωτοπολλαπλασιαστή (εικ. 43) και «διαβάζεται» με κατάλληλα



Εικ. 43: Φωτοπολλαπλασιαστής που βρίσκεται στον μετρητή σπινθηρισμού. Α: Εξωτερική άποψη με βάση από NaI (Tl) διαμέτρου 20 cm. Β: Διαγραμματική άποψη λυχνίας με το κρύσταλλο (Κ), τη φωτοκάθοδο (ΦΚ) και δυνόδους (Δ1 έως Δ11). Πορεία των εκπεπομένων ηλεκτρονίων και ενίσχυσή τους μέσω των δυνόδων. Η μετατροπή της ενέργειας των σωματιδίων-β σε φωτόνια γίνεται με κατάλληλο «υγρό σπινθηρισμού» (fluo) που περιέχει 2,5 λίτρα τολουόλιο, 12,5 gr P.P.O. και 0,5 gr P.O.P.O.P. Γ: Μετρητής ραδιενέργειας με υγρό σπινθηρισμού (Liquid Scintillation counter) κατάλληλος για μέτρηση β-ακτινοβολίας. Διακρίνονται, ο χώρος τοποθέτησης των δειγμάτων (ΧΔ), το ηλεκτρονικό σύστημα μέτρησης, με τρεις διαύλους (Δ1, Δ2, Δ3) και η οθόνη παρουσίασης των «κρούσεων ανά λεπτό» (ΟΠ).

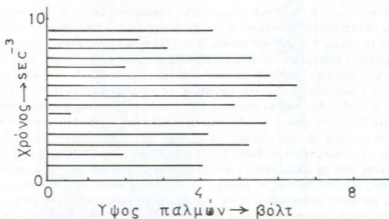
ηλεκτρονικά κυκλώματα, τα οποία μπορούν να τροφοδοτούν με τις μετρήσεις ένα σύστημα ηλεκτρονικού υπολογιστή για επεξεργασία και καταγραφή (ή απεικόνιση) των μετρήσεων της ραδιενέργειας που έχει το δείγμα. Στην Πυρηνική Ιατρική έχει μεγάλη εφαρμογή ο *μετρητής σπινθηρισμού* - γ (gamma counter) καθώς και η γ - κάμερα (gamma camera) που χρησιμοποιούνται για έλεγχο λειτουργίας των διαφόρων ιστών και οργάνων με τη βοήθεια ραδιοσημασμένων ουσιών (βλ. κεφ. 2.5.4.), που εκπέμπουν φωτόνια - γ . **Μετρητής με υγρό σπινθηρισμού** (Scintillation counter): Εκτός της ακτινοβολίας - γ , πολλά ραδιοϊσότοπα εκπέμπουν σωματίδια - β των οποίων η ενέργεια δεν είναι αρκετή για να διεγείρει τα άτομα του κρυστάλλου NaI (TI). Έτσι αν και αρχικά έγινε προσπάθεια αντικατάστασής του με άλλα υλικά ευαίσθητα στα σωματίδια - β (όπως ανθρακένιο ή φωσφόρος), εν τούτοις η μικρή του απόδοση αλλά και οι αυξανόμενες ανάγκες για μέτρηση ραδιενέργειας σε υγρά (π.χ. μετά από κλασμάτωση κυττάρων) που περιείχαν ραδιοσημασμένα βιομόρια, οδήγησε στην εύρεση ενδιάμεσου μέσου, το οποίο να μετατρέπει την ενέργεια των σωματιδίων - β σε φωτόνια ώστε να διεγερθεί ο κρύσταλλος NaI (TI). Πρόκειται για τη χρήση «υγρού σπινθηριστή» (scintillator ή fluo), το οποίο συνήθως είναι μίγμα P.P.O. (Diphenyl 2, 5 oxazole) και P.O.P.O.P. (p - phenyl - 5 - oxazole - 2, 2') των οποίων τα μόρια (παρουσία κατάλληλου οργανικού διαλύτη) έχουν την ιδιότητα να εκπέμπουν φωτόνια ορατής ακτινοβολίας όταν διεγερθούν από σωματίδια - β .

Όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια των σωματιδίων - β (π.χ. 18 Kev για το τρίτιο και 154 Kev για τον άνθρακα - 14) τόσο περισσότερα φωτόνια παράγονται από τα μόρια του σπινθηριστή. Τα φωτόνια αναγνωρίζονται από δύο φωτοπολλαπλασιαστές (ώστε να καταγράφονται μόνο οι εκπομπές από το υγρό σπινθηρισμό και όχι από τυχαίες εκφορτίσεις του φωτοπολλαπλασιαστή) και ενισχύονται ανάλογα με την έντασή τους με κυκλώματα «ανάλυσης ύψους παλμού».

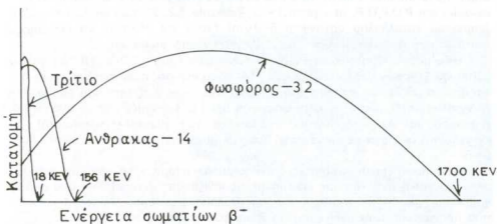
Κατά συνέπεια οι «μετρητές σπινθηρισμού» μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ενεργειακή ανάλυση της εκπεμπόμενης ιονίζουσας ακτινοβολίας από ραδιονουκλidia (εικ. 44) σε αντίθεση με τους θαλάμους ιονισμού Geiger-Mueller, όπου πραγματοποιείται ανίχνευση *αριθμού* σωματιδίων - β .

Τα φωτόνια - γ σε αντίθεση με τα σωματίδια - β δεν ανιχνεύονται εύκολα σε μετρητή με υγρό σπινθηρισμό γιατί η ενέργεια των φωτονίων - γ δεν δεσμεύεται από τα άτομα των οργανικών μορίων του σπινθηριστή (λόγω χαμηλού ατομικού αριθμού).

Οι «μετρητές με υγρό σπινθηρισμό» χρησιμοποιούνται ευρύτατα στη Βιολογία για την ποιοτική και ποσοτική ανίχνευση των βιομορίων που έχουν ενσωματώσει κατά τη βιοσύνθεσή τους ραδιοσημασμένο πρόδρομο μόριο (π.χ. προλίνη σημασμένη με άνθρακα - 14, ή θυμιδίνη σημασμένη με τρίτιο). Επειδή όμως τα διάφορα ραδιοϊσότοπα εκπέμπουν διαφορετικό φάσμα ενεργειών σωματιδίων - β (βλ. πίνακα V και εικ. 45) γι' αυτό είναι δυνατή η αναγνώρισή τους αφού το «ύψος παλμών» που δημιουργούν μέσα από το σύστημα των φωτοπολλαπλασιαστών είναι ανάλογο με την ενέργεια των σωματιδίων - β που τους προκάλεσε (εικ. 44). Π.χ. σε πείραμα με *διπλή ραδιοσημάνση* όπου χρησιμοποιήθηκε



Εικ. 44: Οι παλμοί που δημιουργούνται στο ηλεκτρονικό κύκλωμα του μετρητή έχουν ύψος ανάλογο με την ενέργεια των φωτονίων που τους παρήγαγαν.



Εικ. 45: Τα φάσματα ενεργειών των σωματιδίων-β από τα ραδιονουκλίδια τρίτιο, άνθρακας-14 και φωσφόρος-32 είναι τελείως διαφορετικά και έτσι μπορεί να γίνει διαχωρισμός κατά την ανίχνευση με τον «μετρητή υγρού σπινθηριστή».

Τρίτιο (H - 3) και άνθρακας - 14 (C - 14) (π.χ. σε λευκίνη και σε ουριδίνη αντίστοιχα) μπορεί να μετρηθεί η ακτινοβολία από κάθε ισότοπο ξεχωριστά αφού τα σωματίδια -β του τριτίου έχουν μέγιστη ενέργεια 0, 018 Mev, ενώ εκείνα του άνθρακα - 14 φτάνουν μέχρι 0,154 Mev (εικ. 45, πίνακας V).

Η μεταφορά της ακτινοβολίας -β προς το υγρό σπινθηρισμό μπορεί να διαταραχθεί με χημική απόσβεση (chemical quenching), ενώ η μεταφορά της φωτεινής ενέργειας από το υγρό σπινθηρισμό προς τον φωτοπολλαπλασιαστή μπορεί να παρεμποδιστεί με χρωματική απόσβεση (colour quenching). Και στις δύο πε-

ριπτώσεις γίνεται μετατόπιση του φάσματος κάθε ραδιονουκλιδίου προς χαμηλότερες ενέργειες καθιστώντας προβληματική την εύρεση της αντιστοιχίας $cpm - dpm$ αν δεν βρεθεί ακριβώς η απόσβεση που προκαλείται. Αυτό μπορεί να γίνει με τρεις τρόπους:

α) Με χρησιμοποίηση «εσωτερικής πρότυπης πηγής» (internal standard). Γίνεται προσθήκη σε κάθε δείγμα, γνωστής ποσότητας από το ίδιο (όπως το μετρούμενο) ραδιονουκλίδιο οπότε με τη διαφορά μετρήσεων cpm μπορεί να βρεθεί η «αποδοτικότητα» (efficiency) αφού αυτή ισούται με cpm/dpm .

β) Με χρησιμοποίηση «εξωτερικής πρότυπης πηγής» (external standard). Συνήθως χρησιμοποιείται $Ra - 226$ που βρίσκεται μέσα στο όργανο και μπορεί να μετατοπίζεται κοντά ή μακριά από το μετρούμενο δείγμα· η επίδραση της ακτινοβολίας - γ του $Ra - 226$ στην ουσία που προκαλεί την απόσβεση δίνει πληροφορίες για την ποσότητά της, δηλ. για το μέγεθος της απόσβεσης.

γ) Με χρησιμοποίηση «λόγου διαύλων» (channel ratio). Κατ' αρχάς χαράζεται πρότυπη καμπύλη με χρήση πρότυπου ραδιονουκλιδίου, στο οποίο προστίθεται μια ουσία που προκαλεί απόσβεση (π.χ. τετραχλωριούχος άνθρακας). Στη συνέχεια γίνονται δύο μετρήσεις σε κάθε πρότυπο δείγμα και για δύο περιοχές φάσματος (χαμηλές ενέργειες και υψηλές ενέργειες - E_x και E_y) αλλά μέσα στα όρια του φάσματος των ραδιονουκλιδίων (π.χ. 0 έως 18 KeV για το τρίτιο). Υπολογίζεται ο λόγος cpm_{E_x}/cpm_{E_y} για κάθε συγκέντρωση «ουσίας απόσβεσης» και έτσι προκύπτει η αποδοτικότητα αφού είναι γνωστά τα dpm του πρότυπου ραδιονουκλιδίου. Χαράζεται η καμπύλη με άζονες, λόγος διαύλων έναντι % αποδοτικότητας και τώρα με τη μέτρηση του άγνωστου δείγματος σε δύο ενέργειες και από το λόγο διαύλου που προκύπτει έχουμε την τιμή της αποδοτικότητας. Από αυτή υπολογίζουμε dpm αφού $dpm = \text{αποδ.} \times cpm$.

Παράδειγμα διαχωρισμού H - 3, C - 14

Για τον διαχωρισμό των κρούσεων (cpm) που προέρχονται από το τρίτιο σε σχέση με εκείνες που προέρχονται από τον άνθρακα - 14 εκμεταλευμάστε τις διαφορές ενέργειες των σωματιδίων - β (εικ. 45). Έτσι χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικούς διαλύτες ενίσχυσης παλμών είναι δυνατόν να ρυθμίσουμε τον καθένα για μέτρηση σε αντίστοιχο ύψος παλμών:

Δίσυλος Α: ρυθμίζεται ο διαχωρισμός στην τιμή 0,5.

Δίσυλος Β: ρυθμίζεται ο διαχωρισμός στην τιμή 1,0.

Το δείγμα σφηνεται να μετρηθεί για 20 min και δίνει:

7920 κρούσεις για το δίσυλο Α και

8340 κρούσεις για το δίσυλο Β.

Οι «κρούσεις υποστρώματος» (background) και για τους δύο διαλύτες είναι 20

Να βρεθούν τα dpm για το τρίτιο και τον άνθρακα - 14 του δείγματος.

Γνωρίζουμε ότι:

1) Στον «απαριθμητή με υγρό σπινθηριστή» το φορτίο ενός ηλεκτρονίου δηλ. $1,6 \times 10^{-19}$ coulombs δημιουργεί ένα ύψος παλμού που υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\frac{E_{\beta}}{500} \times \frac{1,6 \times 10^{-19} \times 10^6}{10^{11}} = E_{\beta} \cdot 3,1 \cdot 10^{-5} \text{ και}$$

για $E_{\beta}^H = 18.000$ ev (μέγιστη ενέργεια σωματιδίων - β του H - 3) έχουμε μέγιστο ύψος παλμού - $18.000 \cdot 3,1 \cdot 10^{-5} = 0,56$ Volts

Αντίστοιχα για τον άνθρακα - 14 όπου $E_B^C = 154.000\text{eV}$ έχουμε ύψος παλμού $154.000.3.1.10^{-5} = 4.8 \text{ Volts}$.

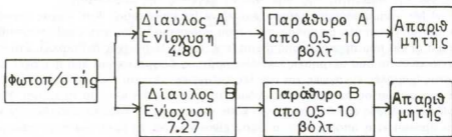
2) Μετά από ρύθμιση των ενισχυτών των διαύλων Α και Β (βλ. εικ. 46) χαράσσονται κομπύλες «αποδοτικότητας» (efficiency) για Η - 3 και C - 14 από όπου συνεπάγεται πως η αποδοτικότητα του διαύλου Α για το Η - 3 είναι $e_A^H = 0,57$, ενώ $e_A^C = 0,24$, $e_B^H = 0,013$ και $e_B^C = 0,72$

3) Αφού οι μετρήσεις ήταν 7920 για το διάλυο Α και 8340 για το διάλυο Β σε 20 min, αυτό σημαίνει: $crmA = 376$, $crmB = 397$

Αν ορίσουμε $X = dpm \text{ H-3}$ και $Y = dpm \text{ C-14}$, τότε ισχύει:

$crmA = 0,57 X + 0,24 Y$ και $crmB = 0,013 X + 0,72 Y$ από όπου υπολογίζεται πως $X = 430 \text{ dpm}$ τρίτιου και $Y = 545 \text{ dpm}$ άνθρακα - 14.

Από τις τιμές αυτές μπορούν να υπολογιστούν και τα crp τρίτιου και άνθρακα - 14 που αντιστοιχούν σε κάθε διάλυο.



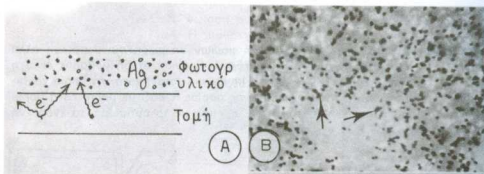
Εικ. 46: Ρύθμιση των ενισχυτών και των «παραθύρων» των διαύλων Α και Β ώστε να γίνει διαχωρισμός των υψηλών παλμών που προέρχονται από τα σωματίδια-β διαφορετικών ενεργειών για τα δύο ραδιοϊσότοπα τρίτιο και άνθρακα-14 (18 Kev και 154 Kev αντίστοιχα).

2.5.4. Αυτοραδιογραφικές μέθοδοι:

Οι μέθοδοι αυτές επιτρέπουν ποιοτική ανίχνευση της ραδιενέργειας και σε μερικές περιπτώσεις ημ - ποσοτική αναγνώριση, αλλά οπωσδήποτε είναι η μόνη μέθοδος εύρεσης της τοπολογίας του ραδιονουκλιδίου, π.χ. σε ιστό, οργανισμό, κύτταρο ή οργανίδιο. Η κλασική αυτοραδιογραφία χρησιμοποιεί φωτογραφικό φίλμ για ανίχνευση ακτινοβολίας όπου χρειάζονται $10^5 - 10^6$ ηλεκτρόνια/cm² φίλμ για να προκληθεί αλλαγή κρυστάλλων βρωμιούχου αργύρου. Η αναλογία τρίτιου: άνθρακα - 14 είναι 1:60, ως προς την ενεργότητα.

Η ανίχνευση της ραδιενέργειας μπορεί να γίνει και με μικρό - αυτοραδιογραφία σε ιστολογικά παρασκευάσματα (με φωτονικό μικροσκόπιο) ή με υπέρ - μικρο - αυτοραδιογραφία σε παρασκευάσματα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Στις περιπτώσεις αυτές (ιδιαίτερα στην τελευταία) χρησιμοποιείται υγρό «πυρηνικό γαλάκτωμα» που περιέχει κόκκους βρωμιούχου αργύρου σε μεγάλη συγκέντρωση, διαλυμένους σε ζελατίνη. Μετά την επικάλυψη του ιστού με το γαλάκτωμα, ακολουθεί «έκθεση» για ανάλογο χρονικό διάστημα (π.χ. 1 - 20 εβδομάδες) και «εμφάνιση» με κατάλληλο αναγωγικό αντιδραστήριο που θα σταθεροποιήσει τους κόκκους που έχουν προσβληθεί από την ακτινοβολία.

Η διαδρομή των σωματιδίων - β μέσα στον ιστό είναι $1\mu\text{m}$ για το τρίτιο, $10\mu\text{m}$ για τον άνθρακα - 14 και το S - 35, ενώ είναι $800\mu\text{m}$ για τον P - 32. Η «μοριακή αυτοραδιογραφία» έχει βοηθήσει στη διαλεύκανση πολλών και σημαντικών κυτταρικών λειτουργιών, όπως είναι η αντιγραφή του DNA, η μεταγραφή, η τοπολογία της μετάφρασης, η πορεία συντιθέμενων πρωτεϊνών, η πορεία και η θέση μεμβρανικών υποδοχέων, κ.ά. (εικ. 47).



Εικ. 47: Αρχή μεθόδου ανίχνευσης ραδιενέργειας με αυτοραδιογραφία οπτικού ή ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Α: Διαγραμματική απεικόνιση, Β: Φωτογραφία που δείχνει την παρουσία ραδιονουκλιδίων στο παρασκεύασμα, με τη μορφή μικρών κόκκων αργύρου στο φωτογραφικό γαλάκτωμα (βέλη).

Ανίχνευση, ποιοτική και ποσοτική βιολογικών μακρομορίων μπορεί να γίνει επίσης μετά από ηλεκτροφόρηση, ξήρανση του πηκτώματος, επικάλυψη με φωτογραφικό φιλμ, έκθεση και φωτογραφική εμφάνιση, οπότε διακρίνονται τα ραδιοσημασμένα μακρομόρια (εικ. 48). Έχει βέβαια προηγηθεί *in vitro* ή *in vivo* ενσωμάτωση του ραδιενεργού πρόδρομου μορίου (βλ. επίσης κεφ. 5.2.3.). Στην



Εικ. 48: Αρχή μεθόδου ανίχνευσης ραδιενέργειας μετά από ηλεκτροφόρηση- αυτοραδιογραφία (Α) ή μετά από ηλεκτροφόρηση- αυτοσπινθηρογραφία (Β). Στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιείται «υγρό σπινθηρισμού» για μετατροπή της χαμηλής ενέργειας σωματιδίων- β του τρίτιου ($E \leq 18\text{ KeV}$) σε φωτόνια, χρησιμοποιώντας P.P.O. (22% σε DMSO).

περίπτωση χρησιμοποίησης τρίτου του οποίου η εμβέλεια των σωματιδίων - β στο νερό είναι μόλις 5μm χρησιμοποιείται «αυτοσπινθηρογραφία» (autofluorography) με P.P.O. (κατ' αντιστοιχία της λειτουργίας του scintillation counter) πριν την ξήρανση του ηλεκτροφορήματος.

2.5.5. Ραδιοανοσολογικές μέθοδοι

Χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση μορίων σε μικρή συγκέντρωση αλλά πολύ σημαντικών για τη ζωή ενός κυττάρου. Η γνωστότερη μέθοδος είναι η «Ραδιο - ανοσοανίχνευση» (RIA - radio - immuno - assay) κατά την οποία χρησιμοποιούνται αντισώματα της ανιχνευόμενης ουσίας X μαζί με ραδιενεργά μόρια άλλης ουσίας που συναγωνίζονται στη δέσμευση με το αντίσωμα, τα ενδογενή μόρια της ουσίας X.

Δοσιμετρία:

Εκτός από τις παραπάνω μεθόδους χρησιμοποιούνται και άλλες για την καταγραφή ιονιζουσών ακτινοβολιών (εικ. 49).

1) **Θάλαμος ιονισμού.** Η ακτινοβολία προκαλεί ζευγάρια ιόντων που συλλέγονται από ηλεκτρόδια. Υπάρχει άμεση αντιστοιχία δόσης και παραγομένων ιόντων/ρεύματος.

2) **Δοσίμετρο Fricke:** Πρόκειται για χημικό δοσίμετρο που χρησιμοποιεί την οξειδωση του δισθενούς σιδήρου:



Η συγκέντρωση του τρισθενούς σιδήρου μετράται με φασματοφωτόμετρο στα 304 nm (UV). Καλύπτει δόσεις από 10 Gy μέχρι 100 Gy.

3) **Φωτογραφικό δοσίμετρο:** Χρησιμοποιείται το μύρισμα φωτογραφικού φιλμ μετά την προσβολή ακτινοβολίας (αυτοραδιογραφίας) και έχει ευαισθησία ~ 400 mGy.

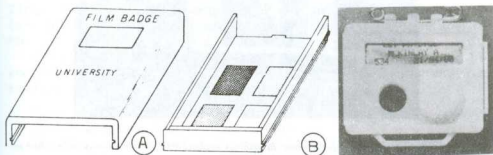
4) **Δοσίμετρο Θερμοφωταύγειας (Thermoluminescence dosimetry):** Χρησιμοποιείται κρύσταλλος φθοριούχου ασβεστίου (CaF₂) που δεσμεύει αντιστρεπτά τα παραγόμενα ηλεκτρόνια. Αποδεσμευόμενα με θέρμανση γίνεται εκπομπή φωτονίων ορατού φάσματος. Η έντασή τους αποτελεί μέτρο της δόσης με την οποία ακτινοβολήθηκε προηγουμένως ο κρύσταλλος. Έχει ευαισθησία από 10⁻⁵ μέχρι 10² Gy.

5) **Θερμιδομετρικές μέθοδοι.** Σύμφωνα και με τον ορισμό του Gray (Gy) η αύξηση θερμοκρασίας μπορεί να θεωρηθεί σαν πολύ ακριβής μέθοδος για τον υπολογισμό της ενέργειας που παρέχεται από μια ιονίζουσα ακτινοβολία σε ένα αδρανές υλικό (από άποψης χημικής αλλοίωσης εξ αιτίας της ακτινοβολίας), όπως π.χ. είναι ο γραφίτης. Η μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως για μεγάλες δόσεις.

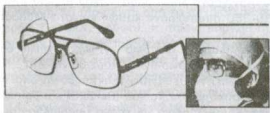
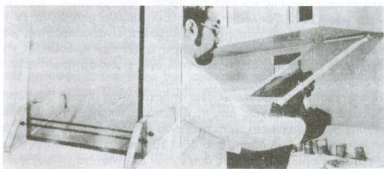
6) Διάφορες άλλες μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση δόσεων

όπως π.χ. η αλλοίωση πολυμερών, ο αποχρωματισμός κρυστάλλων, η αλλαγή αγωγιμότητας ημιαγωγών, ο ρυθμός θνησιμότητας βακτηρίων κ.ά.

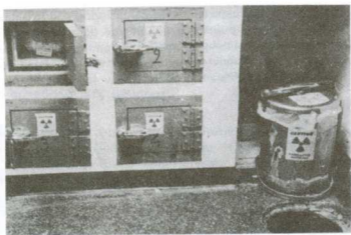
Τα δοσίμετρα είναι τρόποι προειδοποίησης για ύπαρξη επικίνδυνων επιπέδων ακτινοβολήσης και χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά με ειδικές κατασκευές για προφύλαξη (εικ. 50) και αποθήκευση ραδιενεργών (εικ. 51).



Εικ. 49: Διάφορα δοσίμετρα για τον έλεγχο ραδιενέργειας. Α) Είδος φιλμ με φίλτρα από αλουμίνιο, κάδμιο και μόλυβδο. Μετά την έκθεση και την εμφάνιση μπορεί να εκτιμηθεί το ποσό της δόσης που δέχθηκε ο φέρων το δοσίμετρο. Β) Υπάρχουν ακόμα τα δοσίμετρα θερμοφωταύγειας (TLD), στα οποία ένα υλικό από φθοριούχο λίθιο απορροφά την ενέργεια της ακτινοβολίας (X ή γ) που μπορεί να αποδοθεί όταν το θερμάνουμε, με εκπομπή φωτός ανάλογα με τη δόση που απορροφήθηκε.



Εικ. 50: Διάφορα υλικά (κυρίως από χοντρό πλεξιγκλάς) που χρησιμοποιούνται για την προστασία από την ιονίζουσα ακτινοβολία.



Εικ. 51: Δοχεία και κρύπτες αποθήκευσης (βραχύβιων κυρίως) ραδιοισοτόπων μέχρι την τελική μεταφορά ή καταστροφή τους.

2.6. Επίπεδα φυσικής ραδιενέργειας — επιτρεπόμενες δόσεις

Η φυσική ακτινοβολία προέρχεται από κοσμικές ακτίνες, από ραδιενεργά ορυκτά στο έδαφος της Γης και από την τροφή που τρώμε. Αν και μερικά μέρη του πλανήτη μας έχουν 10πλάσια φυσική ακτινοβολία από άλλα, εν τούτοις η γνώση των επιπέδων δόσης αυτής της ακτινοβολίας είναι απαραίτητη για να μπορέσουμε να τεκμηριώσουμε τη βλαβερότητα ή όχι των πρόσθετων (τεχνητών) ακτινοβολιών από ακτίνες Χ, διάφορες εφαρμογές ραδιοισοτόπων, πυρηνικά ατυχήματα ή πυρηνικές εκρήξεις.

Γενικά πιστεύεται ότι ραδιονουκλίδια υπήρχαν στην αρχική σύνθεση της Γης και την τροφοδοτούν συνεχώς από το διάστημα (εκρήξεις ηλίου, *supernovas*, κ.λπ.). Η *Γήινη ακτινοβολία* δηλ. η ακτινοβολία που προέρχεται από τα ραδιενεργά ορυκτά προκαλεί ρυθμό δόσης από 45-130 mrem/χρόνο ανάλογα με την περιοχή, με εξαίρεση ορισμένες χώρες που έχουν ασυνήθιστα υψηλή ραδιενέργεια όπως η Βραζιλία (100 mSv/χρόνο λόγω ραδιενεργού θορίου-232) και άλλες (Αίγυπτος, Γαλλία με 180-350 mrem/χρόνο καθώς και στο Μαδράς της Ινδίας με 1.300 mrem/χρόνο).

Η *Γήινη ακτινοβολία* (κυρίως φωτόνια γ) προέρχεται από Ράδιο-226, Ραδόνιο-222, Ουράνιο-238, Λανθάνιο-138, Ποσειδώνιο-237, Πλουτώνιο-239. Ιδιαίτερα σημαντική θα πρέπει να θεωρηθεί η ακτινοβολία από το Ραδόνιο (Rn-222) που είναι προϊόν διάσπασης του Ραδίου (Ra-226) και βρίσκεται στα δομικά υλικά των κτιρίων (είναι ευγενές αέριο με χρόνο υποδιπλασιασμού 3,8 μέρες). Υπολογίζεται έτσι ότι η αναλογία έκθεσης λόγω ραδονίου είναι 20:1 στους εσωτερικούς χώρους σε σχέση με το ύπαιθρο. Η συνολική μέση ισοδύναμη δόση

για κάθε άνθρωπο από το Ραδόνιο-226 υπολογίζεται σε 60-160 mrem/χρόνο (0,6-1,6 mSv), ενώ σε περιοχές της Σουηδίας φτάνει τα 370 mrem/χρόνο λόγω συγκεκριμένων δομικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν κατά το 1975.

Η συγκέντρωση του Ραδόνιου στον αέρα είναι περίπου 0,5 pCi/lit (δηλ. αντιστοιχεί με έκθεση 7 mrad/χρόνο), και έχει δύο μορφές που προσλαμβάνονται με την εισπνοή:

Ραδόνιο-222: Εκπέμπει σωματίδια -α και είναι προϊόν διάσπασης Ραδίου-226 με $T=3,8$ μέρες. Τα προϊόντα του (πολώνιο, μόλυβδος, βισμούθιο) συνεχίζουν να ακτινοβολούν τους πνεύμονες για πολλά χρόνια μέχρι να καταλήξουν σε Pb.

Ραδόνιο-220 με $T=1$ min. Παρέχει ισοδύναμη δόση στους πνεύμονες 1/4 εκείνης του ραδονίου-222. Η δράση του ελατώνεται από την επικάλυψη των εσωτερικών τοίχων με χαρτί ταπετσαρίας.

Γενικά, η πρόσληψη του ραδονίου γίνεται:

- α) από το έδαφος (διάσπαση ραδίου-226).
- β) από συσσώρευσή του σε κλειστούς χώρους, στα πλαίσια βέβαια του μικρού χρόνου υποδιπλασιασμού ($T=3,8$ ημέρες). Για το σκοπό αυτό επιβάλλεται ο αερισμός των εσωτερικών χώρων.
- γ) από ακτινοβολία των δομικών υλικών. Π.χ. μέτρια ενεργότητα έχουν το τσιμέντο και τα τούβλα, χαμηλή ενεργότητα παρουσιάζουν ο γύψος, ο ασβεστόλιθος, η άμμος, τα χαλίκια, ενώ υψηλή ενεργότητα διαθέτουν ο γρανίτης (~ 200 Bq/Kg) και πορώδεις λίθοι (tuff) (~ 200 Bq/Kg).

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε πως από ακτινοβολία του εδάφους λαμβάνουμε περίπου 0,21-0,43 mSv κυρίως λόγω φωτονίων -γ από κάλλιο-40, ουράνιο-238, θόριο-232 που βρίσκονται στον φλοιό της Γης.

Τέλος, ραδιενέργεια παρουσιάζουν πολλές υδάτινες Ραδιοπηγές, όπως π.χ. στο Ramsar της Βόρειας Περσίας (~ 10 mSv/χρόνο, ισοδύναμη δόση για τους γειτονικούς κατοίκους). Στη χώρα μας υπάρχουν πολυάριθμες ραδιενεργές θερμικές πηγές όπως π.χ. του Παλύνχιντου Μυτιλήνης (6 μονάδες Mach), των δεξαμενών Καμένων Βούρλων (200 μονάδες Mach) και των πηγών Μουσταφά-Λιτζά (350 μονάδες Mach) και Απόλλωνα (560 Mach) της Ικαρίας. (1 Mach αντιστοιχεί με 259 μ Ci/λίτρο νερού ή με 10^7 Bq/lit).

Εκτός από την ακτινοβολία που δεχόμαστε από το περιβάλλον (εξωτερική έκθεση) υπάρχει και η ακτινοβολία ραδιονουκλιδίων μέσα στο σώμα μας (πίνακας XII), π.χ. το Κάλλιο-40 (που είναι από τα αρχαιότερα ραδιονουκλίδια με χρόνο υποδιπλασιασμού $T=1.000$ χρόνια), το οποίο παρέχει ομοιόμορφη ισοδύναμη δόση σ' ολόκληρο το σώμα μας ίση με 0,17 mSv/χρόνο. Δηλαδή σε 70 Kg ανθρώπινου σώματος περιέχονται ~ 40 gr Καλλίου από τα οποία ένα ποσοστό 0,0199% είναι ραδιενεργό και έχει ποσότητα ραδιενέργειας $\sim 0,1$ μ Ci ($3,7 \cdot 10^3$ διασπάσεις/sec.). Στο σώμα μας επίσης υπάρχει ρουβίδιο-87 με $T=5 \times 10^{10}$ χρόνια, άνθρακας-14, ράδιο-226, πολώνιο-210 και στρόντιο-90.

Ραδιονουκλίδιο	Συγκέντρωση pCi	/70·Kg βάρους Διασπάσεις/min	Ετήσια δόση mRad
Κάλιο-40	13.000	23.900	20 (ολόκληρο σώμα)
Άνθρακας-14	87.000	193.000	1 (ολόκληρο σώμα)
Ράδιο-226	120	226	0,5-5 (ολόκληρο σώμα)
Πολώνιο-210	200	444	0,04 (γονάδες)
Στρόντιο-90	500-6.700	1.500-22.000	0,37-4,5 (μυελός των οστών)

Η **κοσμική ακτινοβολία** προέρχεται από το Γαλαξία μας, τον ήλιο και διάφερους εκρήξεις αστέρων. Αν και τα πρωτογενή σωματίδια δεν φτάνουν συνήθως στην επιφάνεια της Γης, εν τούτοις έχουν μεγάλη δευτερογενή δράση και παρέχουν σημαντικά ποσά ισοδύναμης δόσης σε κάθε άνθρωπο (ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και το υψόμετρο) (βλ. επίσης κεφ. 2.1.3). Η ατμόσφαιρα κατακλύζεται από ιονίζοντα σωματίδια πολύ μεγάλης ενέργειας όπως πρωτόνια, σωματίδια-β, ιόντα ηλίου και άλλα βαριά ιόντα, τα οποία ταξιδεύουν για μερικά εκατομμύρια χρόνια. Από την ακτινοβολία αυτή παράγεται δευτερογενής ακτινοβολία με σύγκρουση μορίων αέρα, νετρόνια, σωματίδια -β, μύονια κ.ά. (εικ. 19).

Η ετήσια δόση από κοσμική ακτινοβολία είναι 0,30 mSv σε γεωγρ. πλάτος 50°. Από αυτήν όμως τα νετρόνια δίνουν μόλις 0,02 mSv. Στον Ισημερινό είναι 0,2 mSv και στην κορυφή του Everest φτάνει τα 20 mSv (2.000 mrems). Σε ύψος 40.000 ποδών (πήδηση με αεροπλάνο) ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης φτάνει τα 5 μSv/hr (είναι 0,03 μSv σε επίπεδο θαλάσσης) ενώ σε ύψος 60.000 πόδια ανέρχεται σε 12 μSv/hr. Σε μια πτήση Λονδίνο-N. Υόρκη υπολογίζεται ότι η λήψη ισοδύναμης δόσης είναι 0,036 mSv (δηλ. 3,6 mrems). Ένα ταξίδι στη Σελήνη δηλ. 200 ώρες «πτήσης» επιβαρύνει κάθε αστροναύτη με 3,6 mSv (360 mrems).

Υπολογίζεται ακόμα ότι τα επίπεδα αυτά της κοσμικής ακτινοβολίας έχουν παραμείνει σταθερά για τα τελευταία 500.000 χρόνια (εκτιμήσεις από συσσώρευση ραδιενέργειας σε μετεωρίτες), ενώ κάθε δευτερόλεπτο παράγονται στην ατμόσφαιρα $1,3 \cdot 10^{19}$ άτομα ραδιενεργού άνθρακα-14 από επίδραση «κοσμικών ακτίνων». Έτσι, εκτιμάται ότι υπάρχουν 365.000.000 Ci άνθρακα-14 (αντιστοιχούν με 16 drms/gr αέρα) και 3.000.000 Ci υδρογόνου-3 (τριτίου), στη Γη και στην ατμόσφαιρά της.

Βαρεία φορτισμένα σωματίδια πολύ μεγάλης ενέργειας μπορούν και διαπερνούν το τοίχωμα διαστημόπλοιου προκαλώντας οπτικό ερέθισμα σε αστροναύτες διεγείροντας απ' ευθείας το οπτικό νεύρο.

Συμπερασματικά, οι ολικές ισοδύναμες δόσεις με τις οποίες επιβαρύνονται οι κάτοικοι της Γης από φυσικές πηγές ραδιενέργειας συνοψίζονται στον πίνακα XIII.

ΠΙΝΑΚΑΣ XIII. Επιβάρυνση από φυσικές πηγές ραδιενέργειας (ισοδύναμη δόση)

	Μέση τιμή	Μέγιστη τιμή
Κοσμική ακτινοβολία (μυσόνια κ.λπ.)	0.30 mSv	2 mSv (σε μεγάλο υψόμετρο)
Εσωτερική ακτινοβολία (K-40, Ru)	0.34 mSv	1.5 mSv (σε Αρκτικές περιοχές)
Γήινη/εδάφους (Ra, κ.λπ.)	0.32 mSv	10 mSv (σε ωρισμένες περιοχές)
Κλειστοί χώροι (ραδόνιο-222)	0.6-1.6 mSv	3.7 mSv (Σουηδία)

Τη μέτρηση ακτινοβολίας του περιβάλλοντος εκφράζουμε συνήθως με «ρυθμό εξωτερικής έκθεσης» με $\mu\text{R}/\text{ώρα}$. Π.χ. σε απόσταση 1 m από το έδαφος διαπιστώνεται μέση τιμή 4 $\mu\text{R}/\text{hr}$ (ήταν 19 $\mu\text{R}/\text{hr}$ μετά το ατύχημα του Chernobyl – βλ. κεφ. 5.5.). Σε ύψος 300 μέτρων είναι 4,7 $\mu\text{R}/\text{hr}$, σε ύψος 1.000 μέτρων είναι 6,2 $\mu\text{R}/\text{hr}$ και σε ύψος 4.000 μέτρων είναι 18 $\mu\text{R}/\text{ώρα}$ (1 $\mu\text{R}/\text{ώρα}$ αντιστοιχεί με παραγωγή 0,58 ζευγαριών ιόντων/ $\text{cm}^3\text{-sec}$ καθώς και με 8,15 $\text{mrad}/\text{χρόνο}$ απορρόφηση ακτινοβολίας και με 10^{-13} Ci/λίτρο αέρα).

Επιτρεπόμενες τιμές δόσεων: Σύμφωνα με κανονισμό της «Διεθνούς Επιτροπής Ραδιοπροστασίας» (ICRP-International Commission for Radio Protection), που ιδρύθηκε στα 1928 στη Στοκχόλμη με αφορμή επιπτώσεις που είχαν παρατηρηθεί από ακτίνες-X αλλά και ακτινοβολία ορυκτών ουρανίου, έχουν θεσπιστεί τα παρακάτω (βλ. επίσης πίνακες XIV-XVII) όπως έχουν διαμορφωθεί με πρόσφατες τροποποιήσεις (αν και θα πρέπει να τονιστεί ότι από Βιολογικής άποψης απόλυτα ασφαλής είναι η *μηδενική δόση*):

- Για επαγγελματικά εκτιθέμενους σε ακτινοβολία το όριο ολόσωμης έκθεσης ορίζεται σε 50 mSv (5 rem) το χρόνο.
- Για γυναίκες αναπαραγωγικής ηλικίας η δόση στην κοιλιακή περιοχή δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 13 mSv (1,3 rem) στο τρίμηνο.
- Μετά τη σύλληψη η έκθεση που συσσωρεύεται στο έμβρυο δεν πρέπει να ξεπερνά τα 10 mSv (1 rem) μέχρι τον τοκετό.
- Κατά τη διάρκεια της εγκυμοσύνης σε απασχολούμενες σε ακτινολογικά/ακτινοθεραπευτικά εργαστήρια επιτρέπονται, σύμφωνα με τους κανονισμούς της ΕΟΚ 1.000 $\text{mrem}/\text{χρόνο}$ (500 mrem σύμφωνα με κανονισμούς των Η.Π.Α.).
- Το όριο δόσης για το φακό του οφθαλμού καθορίζεται σε 150 mSv (15 rem) για κάθε έτος (αποφυγή πρόκλησης καταράκτη).
- Το όριο δόσης για ολόσωμη έκθεση του δέρματος είναι 500 mSv (50 rem)/έτος, αλλά όταν η έκθεση προκαλείται από ραδιενεργό μόλυνση τότε το παραπάνω όριο ισχύει για επιφάνεια 100 cm^2 .
- Το όριο δόσης για τα άκρα μέλη του σώματος είναι 500 mSv (50 rem)/έτος.
- ΕΟΚ: όριο 350 Bq/κιλό στα φρούτα και 600 Bq/κιλό στα ψάρια. Οι τιμές αυτές ορίστηκαν από την ΕΟΚ στα πλαίσια οικονομικής πολιτικής μετά το ατύχημα του Τσερνόμιλ (1986) αλλά στη συνέχεια ελαττώθηκαν. Θα πρέπει βέβαια να τονίσουμε στο σημείο αυτό ότι ο καθορισμός ορίων δόσεων στις τροφές από κάθε κράτος καθορίζεται και από κοινωνικο-οικονομικά κριτήρια (βλ. όρια δόσεων μετά από ατύχημα του Τσερνόμιλ – κεφ. 5.5.2.), αφού ληφθεί υπ' όψη η αρχή ALARA (τόσο χαμηλά όσο είναι λογικά εφικτό – As Low as Reasonably Achievable).

ΠΙΝΑΚΑΣ XIV. Μέγιστες επιτρεπόμενες δόσεις (κατά ICRP – Διεθνής Επιτροπή Ραδιοπροστασίας) mSv/χρόνο

Ιστός	Γενικός Πληθυσμός	Εργαζόμενοι κατηγορίας	
		A	B
Ολόκληρο σώμα, γεννητικά κύτταρα, μελός των οστών.	5	50	15
Δέρμα, οστά, θυρεοειδής.	30	300	100
Χέρια, πόδια	75	750	250
Άλλα όργανα	15	150	50

Κατηγορία A: Άμεσα εργαζόμενοι με ραδιενεργά υλικά.

Κατηγορία B: Έμμεσα εργαζόμενοι με ραδιενεργά υλικά.

ΠΙΝΑΚΑΣ XV. Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές πρόσληψης ραδιονουκλιδίων (σε μεγαμπικερέλ/χρόνο) για εργαζόμενους κατηγορίας A (σύμφωνα με σύσταση της ICRP).

Ραδιονουκλίδιο	Εισπονή	Κατάποση
H-3	3.000	3.000
P-32	30	20
Mn-56	600	200
Mn-54	30	10
Co-60	6	20
Sr-90	0,7	1
I-131	2	1
Cs-137	6	4
Ra-224	0,02	0,07

Δόσεις από ιατρικές εφαρμογές: Υπολογίζεται ότι η συνολική δόση για τον μέσο άνθρωπο, από ιατρικές εφαρμογές των ιονιζουσών ακτινοβολιών (ακτινογραφίες απλές, ακτινοσκόπησεις, κ.α) ανέρχεται σε 34 mrem/χρόνο (μελέτες στο μελετό των οστών) και 19 mrem/χρόνο (στα αναπαραγωγικά κύτταρα). Οι παραπάνω εκτιμήσεις έγιναν στην Αγγλία και στις τιμές αυτές βέβαια δεν περιλαμβάνονται οι ειδικές εξετάσεις (π.χ. μαστογραφία, σπινθηρογράφημα) ούτε η ακτινοθεραπεία.

Κατά μερικούς ερευνητές υπολογίζεται πως τα συνηθισμένα ακτινογραφικά μηχανήματα είναι υπεύθυνα για την πρόκληση 1% των περιπτώσεων λευχαιμίας στις Η.Π.Α. και το 0,7% των περιπτώσεων καρκίνου του μαστού. Κάτι τέτοιο βέβαια δεν μπορεί άμεσα να αποδειχθεί αλλά αποτελεί στατιστική εκτίμηση, όπως άλλωστε συμβαίνει με όλες τις επιπτώσεις χαμηλών δόσεων, στον άνθρωπο.

Η μέση ετήσια δόση από την χρήση ακτινογραφικών και ακτινοθεραπευτικών μηχανημάτων υπολογίζεται σε 1 man-Sv για τον πληθυσμό (για 1.000.000 άτομα) και σε 0,5-2 mSv για κάθε εργαζόμενο με αυτά (η αντίστοιχη δόση για οδοντιάτρους που χρησιμοποιούν ακτινογραφικές συσκευές είναι 0,1-0,5 mSv).

ΠΙΝΑΚΑΣ XVI. Επιτρεπόμενα ποσά ραδιενέργειας (σε Bq) για μερικά ραδιονουκλίδια

Ραδιονουκλίδιο	Εργαζόμενοι με ραδιενέργεια Ετήσια πρόσληψη με εισπνοή	Κοινός πληθυσμός	
		Ετήσια πρόσληψη	
		Με εισπνοή	Με κατάποση
³ H 1	3.10 ⁹	3.10 ⁶	3.10 ⁶
³² P 15	3.10 ⁷	3.10 ⁶	2.10 ⁴
⁵⁵ Co 27	10 ⁸	10 ⁷	4.10 ⁶
⁹⁰ Sr 38	7.10 ⁵	7.10 ⁴	10 ⁵
^{127m} Ta 52	10 ⁷	10 ⁴	10 ⁴
¹³² Ta 52	8.10 ⁶	8.10 ⁵	2.10 ⁵
¹³⁴ Cs 55	4.10 ⁷	4.10 ⁶	3.10 ⁶
¹³⁷ Cs 55	6.10 ⁶	6.10 ⁵	4.10 ⁵
¹⁴¹ Ce 58	3.10 ⁷	3.10 ⁶	6.10 ⁴
¹⁴⁴ Ce 58	9.10 ⁵	9.10 ⁴	8.10 ⁵
²³⁵ U 92	5.10 ⁴	5.10 ³	5.10 ⁴
²³⁸ U 92	»	»	»
²⁵⁰ Cf 98	5.10 ²	5.10 ¹	5.10 ⁴

Αντίστοιχες δόσεις λαμβάνουν και τα πληρώματα αεροσκαφών (~2 mSv ετησίως). Ακόμα, η μέση ετήσια δόση από τη χρήση δεκτών τηλεόρασης είναι περίπου 1 mrem το χρόνο.

Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις εργαζομένων που τόσο κατά το πρόσφατο παρελθόν όσο και σήμερα εκτίθενται σε υψηλότερες, από ότι ο υπόλοιπος κόσμος, δόσεις. Π.χ. οι εργαζόμενοι με εναπόθεση φωσφορούχων επιχρυσμάτων, οι εργαζόμενοι σε στοές που δεν αερίζονται, κ.λπ.

ΠΙΝΑΚΑΣ XVII. Μέγιστες επιτρεπόμενες δόσεις στον αέρα και στο νερό, διαφόρων ραδιοϊσοτόπων ($\mu\text{C}/\text{cm}^3$). Διαπιστώνεται πως τα πιο επικίνδυνα στον αέρα είναι τα: Pb-210, Sr-90, Ca-45, ενώ στο νερό είναι τα: Sr-90, Pb-210, I-131.

Στοιχεία	Στον αέρα	Στο νερό	Στοιχεία	Στον αέρα	Στο νερό
¹⁰⁵ Ag	$7 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-4}$	¹⁷⁷ Lu	$2 \cdot 10^{-7}$	0,001
¹¹¹ Ag	$8 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-4}$	⁵⁸ Mn	$5 \cdot 10^{-7}$	0,003
⁷⁶ As	$4 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-4}$	⁹⁹ Mo	$5 \cdot 10^{-7}$	0,003
¹⁹⁸ Au	$1 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-4}$	²⁴ Na	$1 \cdot 10^{-6}$	0,008
¹⁹⁹ Au	$3 \cdot 10^{-7}$	0,002	⁹⁵ Nb	$2 \cdot 10^{-7}$	0,002
⁷ Be	$3 \cdot 10^{-6}$	0,02	⁵⁹ Ni	$7 \cdot 10^{-7}$	0,004
¹⁴ C	$1 \cdot 10^{-5}$	0,003	³² P	$1 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-4}$
⁴⁵ Ca	$8 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-4}$	²¹⁰ Pb	$8 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-6}$
¹⁰⁹ Cd	$7 \cdot 10^{-8}$	0,07	¹⁴⁷ Pm	$4 \cdot 10^{-8}$	0,002
¹⁴¹ Ce	$3 \cdot 10^{-9}$	0,003	¹⁴³ Pr	$9 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-4}$
¹⁴⁴ Ce	$2 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-4}$	¹⁹¹ Pt	$1 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-4}$
³⁶ Cl	$6 \cdot 10^{-7}$	0,004	¹⁹³ Pt	$2 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{-4}$
⁶⁰ Co	$8 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-4}$	⁸⁶ Rb	$4 \cdot 10^{-7}$	0,003
⁵¹ Cr	$4 \cdot 10^{-6}$	0,02	¹⁰⁵ Rh	$2 \cdot 10^{-7}$	0,001
¹³⁴ Cs	$4 \cdot 10^{-7}$	0,001	¹⁰³ Ru	$4 \cdot 10^{-8}$	0,002
¹³⁷ Cs	$2 \cdot 10^{-7}$	0,002	³⁵ S	$1 \cdot 10^{-6}$	0,005
⁶⁴ Cu	$9 \cdot 10^{-7}$	0,005	¹²⁵ Sb	$8 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-4}$
¹⁵⁴ Eu	$2 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-4}$	⁴⁶ Sc	$5 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-4}$
¹⁵³ Eu	$1,5 \cdot 10^{-8}$	0,025	¹¹³ Sn	$3 \cdot 10^{-7}$	0,002
¹⁸ F	$3,5 \cdot 10^{-5}$	0,2	⁸⁹ Sr	$2 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-5}$
⁵⁵ Fe	$7 \cdot 10^{-7}$	0,005	⁹⁰ Sr	$2 \cdot 10^{-10}$	$8 \cdot 10^{-7}$
⁵⁹ Fe	$2 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-4}$	¹⁸² Ta	$2 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-4}$
⁷² Ga	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-4}$	⁹⁶ Tc	$2 \cdot 10^{-7}$	0,001
⁷¹ Ge	$3 \cdot 10^{-6}$	0,02	¹²⁹ Tc	$4 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-4}$
³ H	$1 \cdot 10^{-5}$	0,2	¹⁷⁰ Tm	$1 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-4}$
¹⁶⁶ Ho	$8 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-4}$	⁴⁸ V	$5 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-4}$
¹³¹ I	$6 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-5}$	¹⁸¹ W	$1 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-4}$
¹⁹² Ir	$3 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-4}$	¹³³ Xe	$4 \cdot 10^{-6}$	0,004
⁴² K	$6 \cdot 10^{-7}$	0,003	⁹¹ Y	$9 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-4}$
¹⁴⁰ La	$5 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-4}$	⁶⁵ Zn	$4 \cdot 10^{-7}$	0,002

Κεφάλαιο 3: Τρόπος δράσης των ιονίζουσών ακτινοβολιών στα κύτταρα

Η σειρά των διαδικασιών που συμβαίνουν κατά την επίδραση ιονίζουσας ακτινοβολίας στα κύτταρα μπορεί να θεωρηθεί ότι γίνεται σε τέσσερα διαδοχικά στάδια, ως εξής (εικ. 53):

Φυσικό στάδιο: Αντιπροσωπεύει την πρώτη επαφή της ακτινοβολίας με τα άτομα ή τα μόρια του κυττάρου και εξασκεί επάνω τους, σε χρόνο 10^{-16} sec τις επιδράσεις όπως περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 2.3 (Μηχανισμοί απώλειας ενέργειας): κυρίως ιονισμοί και διεγέρσεις.

Φυσιοχημικό στάδιο: Κατά το στάδιο αυτό και ιδιαίτερα κατά το μηχανισμό της έμμεσης δράσης σχηματίζονται (σε χρόνο 10^{-7} sec) οι πολύ δραστικές όσο και βραχύβιες «ελεύθερες ρίζες» (άτομα ή μόρια στα οποία τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας δεν έχουν αντίθετα spin όπως θα έπρεπε και έτσι είναι πολύ ασταθή).

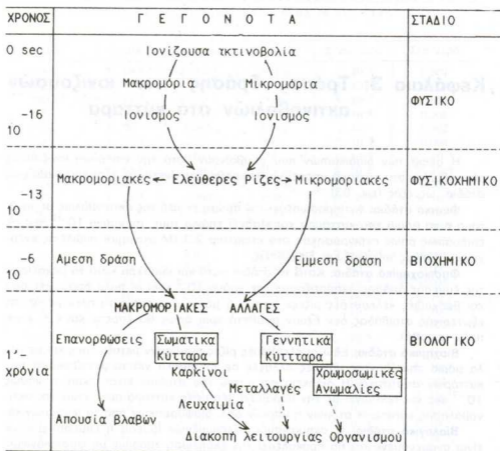
Βιοχημικό στάδιο: Εδώ οι ελεύθερες ρίζες αντιδρούν μεταξύ τους και με άλλα μόρια επιφέροντας μόνιμες αλλαγές σε σημαντικά για το μεταβολισμό των κυττάρων συστατικά. Η διάρκεια και αυτού του σταδίου είναι μικρή, συνήθως 10^{-7} sec και τελειώνει με την παρουσία μέσα στο κύτταρο προϊόντων της ακτινοβόλησης «άτυπων» ατόμων ή μορίων δηλ. διαφορετικών από τα φυσιολογικά.

Βιολογικό στάδιο: Ο σχηματισμός αλλοιωμένων (άμεσα ή έμμεσα) μορίων είναι αναμενόμενο ότι θα προκαλέσει την εκδήλωση κάποιων μη φυσιολογικών φαινομένων που θα αρχίσουν από το *μοριακό επίπεδο* (π.χ. αναστολή πρωτεϊνοσύνθεσης) για να προχωρήσουν στο *κυτταρικό* (π.χ. αναστολή κυτταρικής διαίρεσης) καταλήγοντας σε *επίπεδο οργανισμού* (π.χ. διακοπή ζωής, εκδήλωση κάποιων συμπτωμάτων κ.λπ.). Η πολυπλοκότητα οργάνωσης και μηχανισμών λειτουργίας των κυτταρικών συστατικών δεν έχει επιτρέψει μέχρι σήμερα την απόλυτη κατανόηση των επιπτώσεων σε όλα τα επίπεδα (μοριακό, κυτταρικό, οργανισμικό) παρά μόνο όπου οι δόσεις ακτινοβόλησης είναι πολύ μεγάλες και προκαλείται άμεσα ορατό αποτέλεσμα.

3.1. Άμεση και έμμεση δράση

Οι ιονίζουσες ακτινοβολίες μπορούν να προκαλέσουν χημικές μεταβολές στα

Εικ. 53: Παραστατική απεικόνιση των γεγονότων που ακολουθούν τη διέλευση ιονίζουσας ακτινοβολίας από τη ζωντανή ύλη



βιολογικά συστήματα με άμεση ή με έμμεση δράση ή και με τους δύο τρόπους. Σαν άμεση χαρακτηρίζουμε τη δράση μιας ακτινοβολίας όταν το ίδιο το μόριο που δέχτηκε την ακτινοβολία υφίσταται τη χημική μεταβολή. Σαν έμμεση χαρακτηρίζουμε τη δράση μιας ακτινοβολίας όταν το μόριο που υφίσταται τη χημική μεταβολή δεν δέχτηκε απ' ευθείας την ακτινοβολία αλλά με δευτερογενείς αντιδράσεις.

Η σύλληψη και των δύο αυτών μηχανισμών είναι φανερή κατά την ακτινοβόληση μέσω διασποράς και ιδιαίτερα εκείνων που έχουν σαν μέσο διασποράς το νερό και μακρομόρια στη διασπαρμένη φάση. Τέτοιο σύστημα είναι και το κυτταρόπλασμα των κυττάρων με μέσα διασποράς το νερό και βιομόρια (πρωτεΐνες, νουκλεϊνικά οξέα, υδατάνθρακες, λιπίδια) στη διασπαρμένη φάση.

Η άμεση δράση των ακτινοβολιών στα βιολογικά μακρομόρια εκδηλώνεται συνήθως με διάσπαση ή χημική αλλοίωση του μορίου. Η έμμεση δράση προϋποθέτει πως κοντά στα μακρομόρια βρίσκονται ιονισμένα ή διηγεργμένα μικρομόρια όπως π.χ. μόρια νερού. Θεωρητικά, είναι δυνατόν η έμμεση δράση να προέλθει από επίδραση ιονισμένων ή διηγεργμένων μορίων νερού στα μακρομόρια. Όπως είδαμε όμως, ο χρόνος ζωής των μορίων αυτών είναι τόσο μικρός (μέχρι τη διάσπασή τους ή τη δημιουργία ελευθέρων ριζών) ώστε οι πιθανότητες για μία τέτοια επίδραση είναι ασήμαντες. Έτσι δεχόμαστε πρακτικά πως έμμεση δράση γίνεται με μεταβίβαση ενέργειας *αποκλειστικά από τις ελεύθερες ρίζες* που προκύπτουν με τη ραδιόλυση του νερού.

Δεδομένου πως ο χρόνος ζωής των ριζών αυτών είναι πολύ μικρός* (10^{-5} sec) είναι φανερό πως η μεταβίβαση ενέργειας στα μακρομόρια θα πρέπει να γίνεται μέσα στο χρόνο αυτό. Έτσι, τόσο η άμεση όσο και η έμμεση δράση των ακτινοβολιών στα *μακρομόρια* έχει σαν αποτέλεσμα την *ακαριαία* δημιουργία *πρωτογενών* χημικών μεταβολών στα μακρομόρια αυτά.

3.1.1. Μέθοδοι διάκρισης της άμεσης από την έμμεση δράση

Όταν μια βιολογικά δραστική καθαρή ουσία, π.χ. ένα ένζυμο ή ένας ιός, ακτινοβοληθεί σε ξηρή κατάσταση, τότε η δράση των ακτινοβολιών που ιονίζουν, και που εκδηλώνεται με αδρανοποίηση της αναφερόμενης ουσίας, είναι αναμφισβήτητα άμεση.

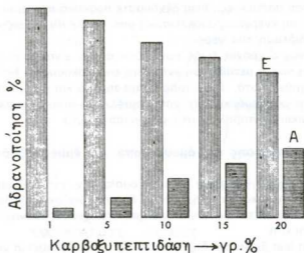
Όταν όμως η ίδια βιολογικά δραστική ουσία ακτινοβοληθεί *in vivo* ή σε υδατικό διάλυμα, τότε η δράση της ακτινοβολίας είναι δυνατόν να είναι άμεση ή έμμεση. Ο έλεγχος του τρόπου δράσης της ακτινοβολίας στην περίπτωση αυτή που σημειωτέον, δεν είναι πάντοτε δυνατός στα βιολογικά συστήματα, γίνεται με τις ακόλουθες μεθόδους:

3.1.2. Διάκριση με αραίωση

Μια δεδομένη δόση ακτινοβολίας παράγει μέσα στο διάλυμα ένα ορισμένο αριθμό ελευθέρων ριζών. Συνεπώς, αν η δράση της ακτινοβολίας είναι έμμεση ο αριθμός των αδρανοποιημένων μακρομορίων ή οργανισμών θα είναι ανεξάρτητος από τη συγκέντρωσή τους, επειδή ο αριθμός των διαθεσίμων για την αντίδραση ριζών στο διάλυμα παραμένει σταθερός. Αντίθετα αν η δράση της ακτινοβολίας είναι άμεση, ο αριθμός των αδρανοποιημένων μακρομορίων ή οργανισμών θα εξαρτάται από τον αριθμό αυτών μέσα στο ακτινοβολημένο διάλυμα και συνεπώς θα είναι ανάλογος με τη συγκέντρωσή τους (εικ. 54). Έτσι αν η

* Η ταχύτητα εξαφάνισης των ελευθέρων ριζών εξαρτάται αφ' ενός μεν από τη συγκέντρωση των βιολογικών μακρομορίων και αφ' ετέρου από τον «ειδικό ιονισμό» της ακτινοβολίας που όπως είδαμε (κεφ. 2.3) καθορίζει την τοπική συγκέντρωση των ριζών. Η τελευταία αυτή ρυθμίζει την ταχύτητα επανασύνδεσής τους.

δράση είναι έμμεση, το επί της % ποσοστό των αδρανοποιηθέντων μακρομορίων ή οργανισμών ελαττώνεται όσο αυξάνει η συγκέντρωση αυτών, με άλλα λόγια το σχετικό μέγιστο της αδρανοποίησης παρατηρείται στο πιο αραιωμένο διάλυμα. Αντίθετα, αν η δράση είναι άμεση, η αναλογία των μεταβληθέντων μορίων παραμένει η ίδια, οποιαδήποτε κι' αν είναι η συγκέντρωση, το δε επί της % ποσοστό της αδρανοποίησης είναι σταθερό για μια δεδομένη δόση.



Εικ. 54: Διαφορά ανάμεσα στην άμεση (A) και στην έμμεση (E) δράση της ακτινοβολίας κατά την αδρανοποίηση ενζύμου.

3.1.3. Διάκριση με χημική προστασία.

Η ικανότητα για αντίδραση των ελεύθερων ριζών που σχηματίζονται μέσα στο νερό είναι μεν πολύ μεγάλη, αλλά αυτές δεν εμφανίζουν καμμία ειδίκευση σε σχέση με τις αντιδράσεις, στις οποίες συμμετέχουν. Έτσι λοιπόν η παρουσία μέσα στο διάλυμα άλλης ουσίας, εκτός της βιολογικά δραστηρικής, μπορεί να ελαττώσει τον αριθμό των αδρανοποιημένων μορίων της δραστηρικής ουσίας, π.χ. του ενζύμου. Με άλλα λόγια, η ξένη ουσία συναγωνίζεται τη δραστηρική ουσία στην αντίδραση με τον περιορισμένο αριθμό των διαθέσιμων ριζών. Αν η προσθήκη μιας ξένης ουσίας ελαττώνει το ποσοστό των αλλοιουμένων δραστηρών μορίων, τότε λέμε ότι αυτή προστατεύει το σύστημα από την ακτινοβολία. Στην περίπτωση αυτή η δράση των ιονιζουσών ακτινοβολιών είναι πιθανώτατα έμμεση. Τέτοιο προστατευτικό αποτέλεσμα από την παρουσία ξένων ουσιών ουδέποτε παρατηρείται στα βιολογικά εκείνα συστήματα, για τα οποία γνωρίζουμε με βεβαιότητα ότι η δράση των ακτινοβολιών είναι άμεση.

3.1.4. Διάκριση με πήξη

Αυτή βασίζεται στη σύγκριση των αποτελεσμάτων της επίδρασης δεδομένης δόσης ακτινοβολίας σε ένα διάλυμα α) στη συνθισιμένη θερμοκρασία και β) στη θερμοκρασία, στην οποία το διάλυμα πήζει. Η πήξη εμποδίζει προφανώς τη διάχυση των ελευθέρων ριζών, οπότε αν η δράση είναι έμμεση, καμμία αντίδραση δεν γίνεται. Αντίθετα, αν η δράση της ακτινοβολίας είναι άμεση, τότε οι χημικές μεταβολές δεν θα εξαρτώνται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Δυστυχώς, είναι περιορισμένος ο αριθμός των βιολογικών συστημάτων που μπορούν και επιζούν μετά από πήξη: σ' αυτά η εφαρμογή της μεθόδου έχει μεγάλη αξία (κατά κανόνα το υλικό ακτινοβολείται σε κατάσταση πήξης και κατόπιν ξαναξεσταίνεται για εξέταση).

3.2. Σχέση ανάμεσα στη δόση της ακτινοβολίας και στο παρατηρούμενο αποτέλεσμα.

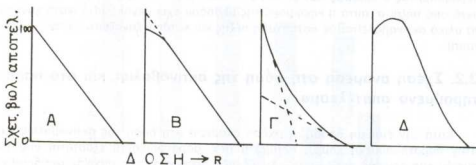
Κατά την έμμεση δράση, η σχέση ανάμεσα στη δόση της ακτινοβολίας και στην παρατηρούμενη χημική μεταβολή (π.χ. αδρανοποίηση) εξαρτάται από το προϊόν της αρχικής αντίδρασης. Αν δηλαδή το προϊόν της αρχικής αντίδρασης μεταξύ μακρομορίου και ελευθέρων ριζών δεν αντιδρά με τις ίδιες ελεύθερες ρίζες, τότε ο αριθμός των μεταβαλλομένων μορίων θα είναι ανάλογος της δόσης. Αν όμως το προϊόν της αρχικής αντίδρασης (π.χ. το αδρανοποιημένο ένζυμο) είναι ικανό να αντιδράσει με ελεύθερες ρίζες, οπότε παίζει ρόλο προστατευτικού πράγοντα, τότε η σημασία αυτής της προστασίας αυξάνει όσο προχωρά η αντίδραση και έτσι η σχέση ανάμεσα στη δόση και στο παρατηρούμενο αποτέλεσμα θα είναι εκθετική. Ακόμα, αν το προϊόν της αντίδρασης αντιδρά με τις ελεύθερες ρίζες με την ίδια ευκολία όπως και το αρχικό μακρομόριο (πράγμα που συμβαίνει πολλές φορές όταν το αρχικό μακρομόριο είναι ένζυμο), τότε μια δόση που παράγει αρκετές ελεύθερες ρίζες που αδρανοποιούν όλα τα ένζυμα που υπάρχουν στο διάλυμα, δεν θα προκαλέσει παρά μονάχα 63% αδρανοποίηση, γιατί τα 37% των ριζών θα αντιδράσουν με τα προϊόντα της αρχικής αντίδρασης. Η διαπίστωση αυτή ωδήγησε στην καθιέρωση της ορολογίας του Lea η οποία εκφράζει την ευαισθησία ενός οργανισμού ή ενός ενζύμου απέναντι στην ακτινοβολία, με τη δόση των 37% δηλ. της δόσης εκείνης κατά την οποία παρατηρείται επιβίωση 37%. Η δόση αυτή, αν διαιρεθεί με τον ολικό αριθμό των ακτινοβολημένων κυττάρων (ή οργανισμών), μας δίνει τη δόση που απαιτείται για την αδρανοποίηση καθ' ενός κυττάρου (ή οργανισμού) ξεχωριστά.

3.2.1. Θεωρία του στόχου

Για να περιγραφεί η σχέση ανάμεσα στη δόση της ιονίζουσας ακτινοβολίας και στο βιολογικό αποτέλεσμα είναι απαραίτητη η ύπαρξη ποσοτικής εκτίμησης/μέτρησης των επιπτώσεων, π.χ. χάραξη καμπύλης θνησιμότητας, μέτρηση

ενεργότητας ενζύμων, ή ανάπτυξης σπόρων. Τέτοιες μετρήσεις οδηγούν συνήθως σε καμπύλη της ακόλουθης μορφής (βλ. εικ. 55).

Α) Εκθετική καμπύλη «απλής προσβολής» (single hit). Αποτελεί την απλούστερη περίπτωση που παρατηρείται π.χ. κατά την ανενεργοποίηση ιών ή ενζύμων. Σε ημιλογαριθμική απόδοση η σχέση είναι $N=N_0 \cdot e^{-D/D_0}$ και εκφράζει τον αριθμό N μορίων ενζύμων (ή ιών) που παραμένουν ενεργά μετά από ακτινοβόληση N_0 μορίων με δόση D .



Εικ. 55: Πιθανές περιπτώσεις προσβολής μορίων ή κυττάρων με απλή προσβολή (Α), πολλαπλή προσβολή (Β), διαφορές ραδιοευσαισθησίας (Γ) και με ενεργοποίηση (Δ). (βλ. κείμενο για λεπτομέρειες).

Η Θεωρία του στόχου προσπαθεί να βρει τη σχέση ανάμεσα στη στοχαστική διαδικασία της απορρόφησης και στις διάφορες καμπύλες δόσης-αποτελεσματικότητας. Δέχεται ότι υπάρχουν σε κάθε μόριο ή κύτταρο περιοχές-στόχοι που πρέπει να ιονιστούν από την ακτινοβολία για να επέλθει καταστροφή του μορίου (ή του κυττάρου). Με αυτή την παραδοχή, η εκθετική καμπύλη του σχήματος Α, δείχνει ότι υπάρχει μια περιοχή σε κάθε μόριο ή κύτταρο που προσβάλλεται από την ακτινοβολία και προκαλεί αδρανοποίηση.

Β) Καμπύλη πολλαπλής προσβολής (multiple hit curve): Παρατηρείται κατά την ακτινοβόληση βακτηρίων ή και ανώτερων οργανισμών και δείχνει ότι σε χαμηλές δόσεις δεν παρατηρείται καμία επίπτωση, ενώ καθώς αυξάνεται η δόση τότε παρατηρούνται επιπτώσεις με εκθετική μορφή. Σύμφωνα με τη θεωρία του στόχου, αυτό που συμβαίνει είναι ή ότι χρειάζονται περισσότεροι από ένας ιονισμοί (προσβολές) για κάθε στόχο ή ότι υπάρχουν δύο (ή περισσότεροι) στόχοι για κάθε κύτταρο, ώστε να προκληθεί καταστροφή. Διάκριση μεταξύ των δύο περιπτώσεων είναι πολύ δύσκολη, αλλά προεκτείνοντας την καμπύλη προς τον κατακόρυφο άξονα μπορούμε να κάνουμε κάποια εκτίμηση για τον αριθμό των προσβολών ή τον αριθμό των στόχων.

Γ) Διφασική καμπύλη (Biphasic curve): Παρατηρείται όταν σε ένα ακτινοβολούμενο πληθυσμό κυττάρων ή οργανισμών υπάρχουν διαφορές ραδιοευσαισθησίας. Έτσι σε χαμηλές δόσεις παρατηρείται άμεση καταστροφή των ευαίσθητων

κυττάρων ή οργανισμών, ενώ σε υψηλότερες δόσεις παρατηρείται ανθεκτικότητα των λιγώτερο ραδιοευαίσθητων. Οι σχετικές ευαισθησίες των δύο, ή περισσότερων κατηγοριών κυττάρων (ή οργανισμών) εκτιμάται με προέκταση της καμπύλης από τα δύο της άκρα προς την αντίθετη πλευρά, εφαπτομενικά.

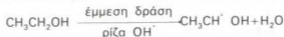
Δ) *Καμπύλη ενεργοποίησης* (stimulation curve): Παρατηρείται κατά την ακτινοβόληση ανωτέρων Φυτών, Ζώων, Φυκών και μερικών Βακτηρίων, δηλ. διαπιστώνεται αύξηση βιωσιμότητας (π.χ. αύξηση ύψους φυτού, αύξηση σύνθεσης RNA) μετά από έκθεση σε χαμηλές δόσεις. Οι περιπτώσεις αυτές δεν μπορούν να εξηγηθούν με τη θεωρία του στόχου, παρά μόνο αν δεχθούμε ότι γίνεται αλλαγή μορίων που σε φυσιολογική κατάσταση διατηρούν σε χαμηλά επίπεδα τις ενεργοποιούμενες διεργασίες (π.χ. καταστροφή αναστολέων σύνθεσης RNA, κ.λπ.).

3.3. Σχετική αποτελεσματικότητα της άμεσης και της έμμεσης δράσης των ακτινοβολιών

Σε πολλές περιπτώσεις ένα ένζυμο ή ένας ιός μπορούν να αδρανοποιηθούν ή με άμεση ή με έμμεση δράση μιας ακτινοβολίας. Πάντως, η αποτελεσματικότητα (δηλ. η απαιτούμενη ενέργεια) δεν είναι η ίδια και στις δύο περιπτώσεις, όπως άλλωστε και οι αρχικές αντιδράσεις δεν είναι οι ίδιες: Η άμεση δράση προκαλεί γενικά διάσπαση του μορίου, ενώ η έμμεση δράση προϋποθέτει την παρουσία μιας ελεύθερης ρίζας, η οποία προστίθεται στο μόρι ή αφαιρεί από αυτό ένα άτομο ή μια ομάδα ατόμων. Αν η ελεύθερη ρίζα αφαιρέσει ένα άτομο από το μόριο, τότε το τελικό προϊόν είναι δυνατόν να είναι το ίδιο ή όμοιο, τόσο κατά την άμεση όσο και κατά την έμμεση δράση. Αυτό συμβαίνει π.χ. στις αλκοόλες όπου το μόριο μπορεί να ενεργοποιηθεί με άμεση δράση και να ελευθερώσει ένα άτομο υδρογόνου:

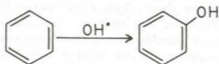


Το ίδιο αποτέλεσμα όμως μπορεί να επιτευχθεί έμμεσα με παρέμβαση της ρίζας OH^\cdot , οπότε το υδρογόνο που ελευθερώνεται ενώνεται με αυτήν και σχηματίζει νερό:



Και στις δύο περιπτώσεις ο *συντελεστής G*, δηλ. ο αριθμός των μεταβαλλομένων ή παραγομένων μορίων/100eV απορροφούμενης ενέργειας είναι ο ίδιος. Διαφορετικό είναι το αποτέλεσμα με το βενζόλιο. Εκεί, κατά την άμεση δράση

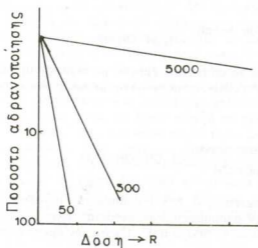
ση το μόριο διασπάται σε μεγάλο αριθμό στοιχείων ή/και ενώσεων όπως π.χ. το υδρογόνο, το ακετυλένιο κ.α. Κατά την έμμεση δράση (παρέμβαση της ρίζας OH^{\bullet}) το κύριο προϊόν, η φαινόλη, παράγεται μετά από προσθήκη της ρίζας OH^{\bullet} στον δακτύλιο του βενζολίου:



Η ενέργεια που χρειάζεται για να σχηματιστεί ένα μόριο φαινόλης με έμμεση δράση είναι περίπου 45eV (δηλ. $G=100\text{ev}/45=2,2$) ενώ κατά την άμεση δράση χρειάζεται ενέργεια 50-100 φορές μεγαλύτερη για να γίνει διάσπαση του μορίου του βενζολίου.

Κατά κανόνα η ανθεκτικότητα των διαφόρων μορίων απέναντι στην άμεση δράση των ακτινοβολιών δεν είναι τόσο μεγάλη όπως στο βενζόλιο. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου η ενέργεια που χρειάζεται για χημική αλλοίωση του μορίου είναι ίδια τόσο κατά την άμεση όσο και κατά την έμμεση δράση. Στις πιο πολλές όμως περιπτώσεις η ενέργεια που χρειάζεται για την αδρανοποίηση ενός μορίου ενζύμου ή ιού με άμεση δράση είναι πολύ μικρότερη από εκείνη που χρειάζεται για την αδρανοποίηση με έμμεση δράση. Κατά κανόνα, αρκεί ένας μόνος ιονισμός ανά μόριο (32,5 ή 35eV) για να αδρανοποιηθεί ένας ιός ή ένας βακτηριοφάγος με άμεση δράση, ενώ σε αραιωμένο διάλυμα (έμμεση δράση) απαιτούνται χίλιοι περίπου ιονισμοί ανά μόριο.

Η απαιτούμενη δόση για την αδρανοποίηση ενός δεδομένου (επί της %) ποσού μορίων ενζύμου ή ιού σε διάλυμα ελαττώνεται όσο μειώνεται η συγκέντρωσή τους (εικ. 56) λόγω συμβολής του έμμεσου αποτελέσματος. Αν D_0 παριστάνει



Εικ. 56: Συμπεριφορά της συγκέντρωσης ενζύμου (σε mg/ml) στο ποσοστό αδρανοποίησής του.

τη δόση 37% για την άμεση δράση (η οποία, όπως είδαμε, εξαρτάται από τη συγκέντρωση), τότε η δόση D_c των 37% στη συγκέντρωση c (ανά γραμ./κυβ. εκατ.) βρίσκεται με τη σχέση: $D_c = D_0 / (1 + a/c)$, όπου a είναι η σχέση μεταξύ της ενέργειας της απαιτούμενης για αδρανοποίηση με έμμεση δράση (δηλαδή του αριθμού των μορίων της διαλυμένης ουσίας, των αδρανοποιουμένων για κάθε ιονισμό που προκαλείται μέσα στο διαλυτικό μέσο) και της ενέργειας που απαιτείται για αδρανοποίηση με άμεση δράση (δηλαδή του αριθμού των μορίων της διαλυμένης ουσίας των αδρανοποιουμένων για κάθε ιονισμό αυτών των μορίων). Όταν η άμεση δράση είναι αποτελεσματικότερη της έμμεσης, το D_c πλησιάζει το D_0 , για να εξισωθεί εντελώς με αυτό ($D_c = D_0$), όταν η αποτελεσματικότητα της άμεσης δράσης και σε σχετικά αραιά διαλύματα είναι πάρα πολύ μεγαλύτερη της έμμεσης (οπότε το a έχει πολύ μικρή τιμή). Σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις η δόση αδρανοποίησης (D_c) δεν εξακολουθεί ελαττούμενη, αλλά φθάνει σε μια οριακή τιμή, πέρα της οποίας παραμένει σταθερή, διότι στις αραιώσεις αυτές οι ελεύθερες ρίζες δεν έχουν πλέον επίδραση, επειδή αντιδρούν περισσότερο μεταξύ τους παρά με τη διαλυμένη ουσία. Με τις συνθήκες αυτές η απόδοση της έμμεσης δράσης (και συνεπώς και ο συντελεστής a) ελαττώνεται, όταν μειωθεί η συγκέντρωση. Το μέσο σημείο, όπου η δόση των 37% D_c γίνεται ίση με $D_0/2$, επιτυγχάνεται όταν η συγκέντρωση του υποστρώματος ανά γραμ./κυβ. εκατ. είναι αριθμητικά ίση με το a .

Όταν ακτινοβολεί κανείς μη καθαρά παρασκευάσματα, πρέπει να έχει υπ' όψη του ότι οι προσμίξεις δρουν σαν προστατευτικοί παράγοντες και ελαττώνουν την απόδοση της έμμεσης δράσης και συνεπώς την τιμή του συντελεστή a .

Για τον ιό της μωσαϊκής του καπνού, όπως και για τους περισσότερους ιούς η έμμεση δράση δεν είναι αποτελεσματική, το a είναι της τάξης των 10^{-4} και σαν αποτέλεσμα η δόση των 37% δεν εξαρτάται από τη συγκέντρωση, παρά μόνο όταν αυτή είναι μικρότερη των 2×10^{-3} γραμ./ cm^3 . Η προσθήκη μικρών ποσών ζελατίνης (προστατευτική ουσία) ελαττώνει ακόμη περισσότερο την αποτελεσματικότητα της έμμεσης δράσης, της οποίας η συμβολή στην αδρανοποίηση γίνεται ίση προς το μηδέν και στις μεγαλύτερες ακόμη δυνατές αραιώσεις. Με άλλες λέξεις σ' όλη την περιοχή των δυνατών συγκεντρώσεων η δόση των 37% γίνεται ανεξάρτητη από την έμμεση δράση.

Για τα ένζυμα η απόδοση της έμμεσης δράσης είναι πολύ μεγαλύτερη παρά για τους ιούς και κυμαίνεται μεταξύ 10^{-2} και 1. Η αντίστοιχη τιμή του a είναι επίσης μεγαλύτερη, στα συνηθισμένα δε διαλύματα (συγκέντρωση 1%) η συμβολή της έμμεσης δράσης στην αδρανοποίηση είναι σημαντική, αν όχι επικρατούσα. Εδώ επίσης η παρουσία ξένων ουσιών δρα προστατευτικά, αλλ' είναι αδύνατον να προβλέψει κανείς την αποτελεσματικότητά τους.

Αν και τα δεδομένα τα οποία προκύπτουν από τα πειράματα *in vitro* δεν μπορούν να εφαρμοστούν αμέσως στα *in vivo* παρατηρούμενα φαινόμενα (ο βαθμός προστασίας σ' αυτά είναι άγνωστος), πάντως αυτά δείχνουν ότι ο ρόλος της έμμεσης δράσης είναι πιθανώτατα σημαντικότερος για την αδρανοποίηση των ιών παρά των ενζύμων.

Οι βιταμίνες, όπως λ.χ. το ασκορβικό οξύ και το νικοτιναμίδιο, σε υδατικό

διάλυμα αδρανοποιούνται σε μεγαλύτερο βαθμό στους 4°C παρά στους -35°C. Το ότι και στη χαμηλή θερμοκρασία των -35°C επιτελείται ακόμη μικρός βαθμός αδρανοποίησης πρέπει να αποδοθεί στην άμεση δράση. Όταν οι ουσίες αυτές διαλυθούν μέσα σε χυμό πορτοκαλιού αντί μέσα σε νερό, τότε η αδρανοποίηση αυτών στους 18°C είναι πολύ ασθενέστερη, αλλ' η επίδραση της θερμοκρασίας εξαφανίζεται σχεδόν ολοκληρωτικά. Πιθανώς ο χυμός των πορτοκαλιών να δρα σαν προστατευτικός παράγοντας, ελαττώνοντας το έμμεσο, όχι όμως και το άμεσο αποτέλεσμα.

3.4. Δράση ελευθέρων ριζών

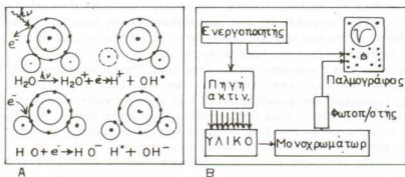
Ελεύθερες ρίζες (free radicals) είναι άτομα ή μόρια που προκύπτουν από άμεση επίδραση της ακτινοβολίας στα μόρια του νερού. Πρόκειται για ασταθείς μορφές μορίων εξ' αιτίας του ασύζευκτου (δηλ. με ίδιο spin) ζεύγους ηλεκτρονίων της εξωτερικής στοιβάδας. Η διασπορά των ριζών αυτών είναι ο κύριος φορέας της έμμεσης δράσης.

3.4.1. Ραδιόλυση του νερού

Εξ αιτίας της μεγάλης περιεκτικότητας των κυττάρων σε νερό, η έμμεση επίδραση της ακτινοβολίας σε σχέση με τη ραδιόλυση του νερού, είναι πολύ σημαντική (εικ. 57). Μετά από έναν αρχικό ιονισμό, όπου παράγονται «ξηρά» ιόντα:



ακολουθεί μια σειρά φυσικοχημικών αντιδράσεων όπως έχουν προταθεί από τους Samuel και Maggee, οι οποίοι θεωρούν ότι το ελεύθερο ηλεκτρόνιο που



Εικ. 57: Πειραματική διάταξη ανίχνευσης των προϊόντων (Α) της ραδιόλυσης του νερού με τη βοήθεια «παλμών» ακτινοβολίας (Β). Δίνεται ένας σύντομος παλμός διάρκειας 10⁻⁹ έως 10⁻³ sec και τα προϊόντα ανιχνεύονται με φασματοφωτομετρία απορρόφησης.

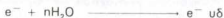
παράγεται, χάνει ενέργεια πολύ κοντά (~350Å) στο μητρικό (ή πατρικό) ιόν, (αφού το H_2O^+ έχει εμβέλεια 85Å) ώστε:



με αποτέλεσμα το διηγεμένο μόριο νερού (H_2O^*) να διασπαστεί, σχηματίζοντας δύο πολύ δραστικές *ελεύθερες ρίζες*, δηλ. άτομα ή μόρια με ασύζευκτα ηλεκτρόνια στην εξωτερική τους στιβάδα και κατά συνέπεια ασταθή – Συμβολίζονται με μια τελεία επάνω δεξιά:



Σύμφωνα με τους Platzman και Fröhlich αυτό που συμβαίνει είναι ότι το αρχικό («ξηρό») ηλεκτρόνιο χάνει ενέργεια συνδεδεμένο με μόρια νερού (δηλ. δημιουργείται «ενυδατωμένο ηλεκτρόνιο»)



ενώ το μητρικό ιόν (H_2O^+) διασπάται:



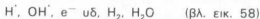
Έτσι το πρωτόνιο (H^+) που δημιουργήθηκε αντιδρά με το ενυδατωμένο ηλεκτρόνιο παράγοντας την ελεύθερη ρίζα H^\cdot :



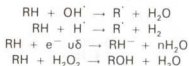
Βλέπουμε λοιπόν ότι και με τους δύο τρόπους παράγονται ελεύθερες ρίζες OH^\cdot και H^\cdot που με τη σειρά τους αντιδρούν για σχηματισμό νερού, υδρογόνου και υπεροξειδίου του υδρογόνου:

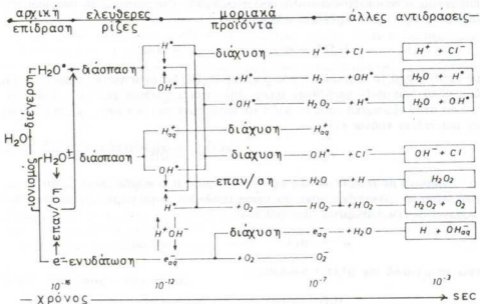


Όλες οι παραπάνω αντιδράσεις γίνονται *πολύ γρήγορα* δηλ. μέσα σε ένα δεκάκις εκατομμυριοστό του δευτερολέπτου (10^{-7} sec), ώστε τελικά σχηματίζονται τα παρακάτω μόρια που με τη σειρά τους είναι διαθέσιμα για αντιδράσεις:



Ακολουθεί αντίδραση των προϊόντων αυτών με άλλα μόρια:





Εικ. 58: Πορεία της ραδιόλυσης του νερού μετά την επίδραση ιονίζουσας ακτινοβολίας.

Με άλλα λόγια η ραδιόλυση του νερού καταλήγει σε οξειδωτικές αντιδράσεις. Η αντίδραση των ριζών $H\cdot$, $OH\cdot$ και του ενυδατωμένου ηλεκτρονίου e^- υδ με διάφορα βιολογικά μόρια είναι η ακόλουθη (Πίνακας XVIII):

ΠΙΝΑΚΑΣ XVIII: Αντιδράσεις των προϊόντων ακτινοβόλησης με βιολογικά μόρια (Nieman, 1983)

Βιολογικό μόριο	Ρυθμός αντίδρασης (mol/sec)		
	Ενυδατωμένο ηλεκτρόνιο (e^- υδ)	Ελεύθερη ρίζα $H\cdot$	Ελεύθερη ρίζα $OH\cdot$
e^-	6×10^9	$2,5 \times 10^{10}$	3×10^{10}
H	$2,5 \times 10^{10}$	2×10^{10}	2×10^{10}
$OH\cdot$	3×10^{10}	2×10^{10}	6×10^9
H_2O	16	—	—
o_2	2×10^{10}	$2,2 \times 10^{10}$	—
CO_2	8×10^9	$\sim 10^8$	3×10^8
CH_3OH	$\sim 10^8$	$1,6 \times 10^8$	5×10^8
Θυμίνη	2×10^{10}	2×10^8	5×10^9
Θυμιδίνη	—	$2,5 \times 10^8$	4×10^9
Ουρακίλη	$7,7 \times 10^9$	—	$4,5 \times 10^9$
Κυτασίνη	8×10^9	—	4×10^9
Κυτιδίνη	10^{10}	—	4×10^9
Αδερίνη	3×10^{10}	8×10^7	4×10^9
Αδενοσίνη	10^{10}	$1,4 \times 10^8$	$3,6 \times 10^9$

3.4.2. Αντιδράσεις των ελευθέρων ριζών του νερού με ανόργανα και οργανικά μόρια

Όπως είδαμε, μέρος των σχηματιζομένων κατά τον ιονισμό του νερού ελευθέρων ριζών αντιδρούν αμέσως μεταξύ τους και δίνουν γένεση σε νέα μόρια (H_2 και H_2O_2). Συνεπώς το ποσοστό αυτό των ριζών δεν είναι διαθέσιμο να αντιδράσει με άλλα μικρομόρια ή μακρομόρια. Το υπόλοιπο των ελευθέρων ριζών διαχέεται μέσα στο διάλυμα και μπορεί να αντιδράσει με παντοειδή μόρια του συστήματος.

3.4.2.1. Αντιδράσεις της ρίζας OH^\cdot

Η ρίζα αυτή είναι δυνατόν να προκαλέσει τις ακόλουθες αντιδράσεις: α) οξειδώσεις, όπως, λ.χ. $Fe^{++} + OH^\cdot \rightarrow Fe^{+++} + OH^-$, β) απόσπαση ενός ατόμου υδρογόνου, όπως π.χ. $CH_3 \cdot CH_2OH + OH^\cdot \rightarrow CH_3 \cdot CHOH + H_2O$, γ) υποκατάσταση στην περιοχή διπλού δεσμού και δ) αναγωγή μιας ισχυράς οξειδωτικής ουσίας, όπως π.χ. $Ce^{++++} + OH^\cdot + H_2O \rightarrow Ce^{+++} + H_2O_2 + H^+$.

3.4.2.2. Αντιδράσεις της ρίζας H^\cdot

Η δραστηριότητα της ρίζας αυτής είναι πολύ περιορισμένη, διότι ταυτόχρονα με το σχηματισμό της αντιδρά ταχύτατα με μοριακό οξυγόνο, που παρέχει την ρίζα HO_2^\cdot .

3.4.2.3. Αντιδράσεις της ρίζας HO_2^\cdot (υπεροξύλειο).

Η ρίζα αυτή είναι δυνατόν όπως είδαμε, να προέλθει από την ένωση της ρίζας H^\cdot με το μοριακό οξυγόνο. Άλλοι τρόποι σχηματισμού της είναι οι ακόλουθοι:

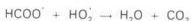


ή

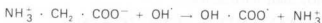


Η ρίζα HO_2^\cdot έχει μικρότερη ικανότητα αντίδρασης και συνεπώς μακρότερη ζωή από τη ρίζα OH^\cdot : Είναι ισχυρό οξειδωτικό μέσο (το οξειδαναγωγικό δυναμικό της είναι μικρότερο του OH^\cdot) και συλλαμβάνει εύκολα ένα ηλεκτρόνιο, μετατρέπόμενη σε ιόν:





Σε υδατικό διάλυμα η κυριώτερη αντίδραση μεταξύ ελευθέρων ριζών και αμινοξέων είναι η απαμίνωση των τελευταίων:



Παρόμοια αλυσιδωτή αντίδραση παρατηρείται για τα περισσότερα των αμινοξέων (περιλαμβανομένης και της έχουσας ιμιδαζολικό χαρακτήρα ιστιδίνης). Εξαίρεση αποτελεί η κυστεΐνη, στη οποία παρατηρείται οξειδωση της ομάδας SH ($2\text{SH} \rightarrow \text{S} \cdot \text{S} + \text{H}_2$) και τα αρωματικά αμινοξέα (φαινυλαλανίνη και τυροσίνη), στα οποία διαπιστώθηκε οξειδωση του βενζολικού δακτυλίου προς φαινολικό.

Σε σχέση με τα βιολογικά μακρομόρια (ένζυμα κλπ.) είναι γνωστό ότι αυτά αδρανοποιούνται κατόπιν ακτινοβόλησης, οι χημικές λεπτομέρειες όμως της αδρανοποίησης δεν είναι ακόμη γνωστές.

3.4.3. Επίδραση των ακτινοβολιών στα υδροκολλοειδή

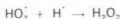
Εκτός από τις χημικές μεταβολές που προκαλούν σε ένα σύστημα διασποράς οι ιονίζουσες ακτινοβολίες, είναι δυνατόν να έχουμε, αν το σύστημα βρίσκεται στην κολλοειδή κατάσταση, και μεταβολές των φυσικών ιδιοτήτων του. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία για το κυτταρόπλασμα το οποίο είναι ένα υδρόφιλο πολυφασικό κολλοειδές σύστημα.

Η ακτινοβόληση ενός τέτοιου κολλοειδούς συστήματος συνεπάγεται μεταβολή του ηλεκτροκινητικού δυναμικού (ζ) των μικκυλίων, που μετρούμε με έλεγχο της ταχύτητας μετακίνησής τους κατά την ηλεκτροφόρηση. Το δυναμικό αυτό είναι συνάρτηση του φορτίου του μικκυλίου και του πάχους του περιβάλλοντος αυτό υδατινού περιβλήματος. Το υδάτινο περίβλημα σχηματίζεται, ως γνωστόν, γύρω από κάθε μικκύλιο από ηλεκτρικά δίπολα μόρια νερού, που λόγω του φορτίου του μικκυλίου δεσμεύονται από αυτό ηλεκτροστατικά. Το πάχος του περιβλήματος καθορίζει το βαθμό ενυδάτωσης του μικκυλίου. Όταν ακτινοβολήσουμε ένα τέτοιο σύστημα, προκαλούμε λόγω ραδιόλυσης του νερού ελευθέρωση θερμικών ηλεκτρονίων και σχηματισμό ιόντων, τα οποία ενούμενα με τα μικκύλια είναι δυνατόν να μεταβάλουν το φορτίο τους και συνεπώς και το ηλεκτροκινητικό δυναμικό.

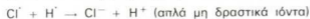
Από τα παραπάνω προκύπτει, ότι κατά την εξέταση των αποτελεσμάτων της επίδρασης ιονιζουσών ακτινοβολιών σε ζωντανούς οργανισμούς πρέπει να έχουμε υπ' όψη μας και τη δυνατότητα καθαρά φυσικοχημικών μεταβολών στο κυτταρόπλασμα και στα κυκλοφορούντα υγρά.

3.5. Ραδιοευαισθησία — Ο ρόλος του οξυγόνου

Το οξυγόνο που υπάρχει στα κύτταρα, σαν ενεργοποιητής της αναπνευστικής αλυσίδας για παραγωγή ενέργειας με τη μορφή τριφωσφορικής αδενοσίνης (ΑΤΡ) επηρεάζει σημαντικά τις αντιδράσεις των ελευθέρων ριζών:



Αντίθετα άλλα ανόργανα μόρια ελαττώνουν τη δράση των ελευθέρων ριζών:



3.6. Επανορθωτικές διεργασίες — ραδιοευαισθητοποιητές (sensitizers)

Τροποποίηση των βλαβερών επιπτώσεων της ιονίζουσας ακτινοβολίας στη ζωντανή ύλη μπορεί να γίνει σε διάφορα επίπεδα όπως π.χ. στο αρχικό στάδιο του σχηματισμού των ελευθέρων ριζών. Όπως αναφέρθηκε, το οξυγόνο και το χλώριο επηρεάζουν τη δράση των ελεύθερων ριζών, καθώς και η ιστιδίνη που ελαττώνει σημαντικά τη δράση των ριζών. Ακόμα, οι θειοενώσεις επαναφέρουν τις οργανικές ενώσεις στην αρχική τους μορφή π.χ.



Θα πρέπει όμως να τονιστεί ότι οι παραπάνω αντιδράσεις είναι δυνατές εφόσον δεν έχει μετατραπεί η οργανική ένωση σε ρίζα υπεροξειδίου, δηλ. $R^{\cdot} + O_2 \rightarrow RO_2^{\cdot}$ (δραστική ρίζα)

Αύξηση της ευαισθησίας του DNA στην ακτινοβολία μπορεί να γίνει αν αντικατασταθεί (π.χ. κατά την αντιγραφή του DNA) η βάση θυμίνη από 5-βρωμοουρακίλη. Τροποποίηση των βλαβερών επιπτώσεων γίνεται επίσης με ελάττωση του ρυθμού δόσεων της ακτινοβολίας και ιδιαίτερα όταν συμβαίνουν επανορθωτικές διεργασίες (αυτό δεν συμβαίνει όμως για ακτινοβολίες με μεγάλο LET).

Κεφάλαιο 4: ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ ΑΠΟ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ

Η πληθώρα των επιστημονικών εργασιών που έχουν πραγματοποιηθεί αμέσως μετά την ανακάλυψη των ακτίνων Χ (1895) και της ραδιενέργειας (1896) μέχρι σήμερα ως προς τις επιπτώσεις τους στη «ζωντανή ύλη», δεν μπορεί παρά μόνο περιληπτικά να συμπεριληφθεί στη σύντομη αυτή ανασκόπηση.

Τα πειράματα που έχουν γίνει αφορούν σχεδόν όλες τις κατηγορίες βιομορίων, κυττάρων και ιστών σε ένα μεγάλο αριθμό προκαρυωτικών και ευκαρυωτικών ειδών, Φυτικών και Ζωικών οργανισμών κάτω από διάφορες δόσεις ακτινοβολίας, συνθήκες θερμοκρασίας, συγκέντρωση οξυγόνου και άλλων παραγόντων (π.χ. ραδιοευαίσθητοποιητών ή ραδιοπροστατευτικών ουσιών). Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται παράθεση των κυριωτέρων συμπερασμάτων από τις ογκώδεις αυτές μελέτες των τελευταίων 60 ετών:

4.1. Επιπτώσεις στο υποκυτταρικό επίπεδο

4.1.1. Άμεση δράση των ακτινοβολιών επί των μακρομορίων.

Κατά την ακτινοβόληση ενός οργανικού μορίου ο αριθμός των αντιδράσεων, που είναι δυνατόν να προκύψουν, είναι περιορισμένος. Οι δύο πιθανότερες αντιδράσεις είναι: α) Απώλεια ενός ατόμου υδρογόνου (ή μιας ρίζας CH_3 -) και σχηματισμός μιας μακρομοριακής ρίζας. Οι ρίζες αυτές είναι δυνατόν (με τη βοήθεια και της θερμικής κίνησης) να ενωθούν μεταξύ τους και να σχηματίσουν ένα μεγαλύτερο συκρότημα, που έχει συνήθως διαφορετικές χημικές και φυσικές ιδιότητες από το αρχικό μακρομόριο. β) Διάσπαση του μακρομορίου σε δύο μικρότερα σταθερά μόρια, που δεν μπορούν να ανασυνδεθούν.

Στα πρωτεϊνικά μακρομόρια ή άμεση δράση των ακτινοβολιών έχει κατά το πλείστον σαν αποτέλεσμα τη διάσπαση των πολυπεπτιδικών αλύσεων στα ση-

μεία των πεπτιδικών δεσμών και την παραγωγή μορίων μικροτέρου μοριακού βάρους. Στα νουκλεοπρωτεϊνικά μόρια επέρχεται συνήθως διαχωρισμός της ιστόνης από τα νουκλεϊνικά οξέα. Τα μεγάλοι μεγέθους πολυνουκλεοτίδια απο- πολυμερίζονται παρέχοντας έτσι μικρότερα μόρια.

4.1.2. Έμμεση δράση των ακτινοβολιών επί των μακρομορίων.

Κατά την έμμεση δράση η χημική μεταβολή του μακρομορίου οφείλεται ή στη μεταβίβαση σ' αυτό ενεργείας (φορτίου) από τις ελεύθερες ρίζες του νερού, ή σε χημικές αντιδράσεις μεταξύ των ριζών αυτών και του μακρομορίου. Οι λά- γω έμμεσης δράσης παραγόμενες χημικές μεταβολές των μακρομορίων είναι κα- τά βάση όμοιες με τις παρατηρούμενες κατά την άμεση δράση, δηλαδή οφείλον- ται κυρίως σε πολυμερισμούς ή αποπολυμερισμούς των μορίων, συνοδευόμενοι συνήθως από μεταβολή των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων αυτών. Έτσι π.χ. οι πρωτεΐνες αποδιατάσσονται κατά κανόνα, παρατηρείται δε μεταβολή της στροφι- κής ικανότητας, του δείκτη διάθλασης, της επιφανειακής τάσης, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και του ιξώδους των.

Τα κατά την επίδραση των ιονίζουσών εκτινοβολιών επί των οργανισμών, παρατηρούμενα αποτελέσματα χαρακτηρίζονται από το ότι αρκεί μία εξαιρετικά μικρή ποσότητα ενέργειας για να προκαλέσει σημαντικές μεταβολές. Παράγοντες που συμβάλλουν στην αποτελεσματικότητα της δράσης των ακτινοβολιών είναι αφ' ενός το γεγονός, ότι όλα τα μέρη του οργανισμού είναι εξ ίσου προσιτά στην ακτινοβολία, και αφ' ετέρου η από αυτήν παραγωγή σε υψηλή τοπική συγκέν- τρωση εξαιρετικά δραστικών ουσιών (όπως λ.χ. του υπεροξειδίου του υδρογόνου του παραγόμενου κατά μήκος της τροχιάς κάθε ιονίζοντος σωματιδίου). Ο εμπει- ρικός νόμος των Bergonie και Tribondeau θεωρεί ότι η ραδιοευαισθησία είναι μεγάλη όταν α) υπάρχει μεγάλος αριθμός μίτωσης, β) η κυτταρική διαίρεση διαρ- κεί πολύ σε σχέση με τη διάρκεια του κυτταρικού κύκλου και γ) υπάρχει έλλειψη κυτταρικής εξειδίκευσης.

Οι μεταβολές μικρών μορίων, όπως λ.χ. βιταμινών, τριφωσφορικής αδενοσί- νης (A.T.P.) κ.λπ., δεν είναι δυνατόν να είναι η αιτία των εμφανών βιολογικών βλαβών, διότι οι ακτινοβολίες δεν μπορούν να προσβάλουν παρά μικρό μόνο μέρος της διαθέσιμης ποσότητας των ουσιών τούτων στον οργανισμό. Αντίθετα, η άμεση ή έμμεση (για τις ελεύθερες ρίζες) αντίδραση με ζωτικά μακρομόρια, στα οποία η μεταβολή ενός μόνο ατόμου από τη δράση της ακτινοβολίας είναι δυνατόν να προκαλέσει την αδρανοποίηση ενός ολόκληρου δομικού σχημα- τισμού, που περιέχει εκατοντάδες άτομα, όπως λ.χ. οι πολυπεπτιδικές αλυσίδες και τα πολυνουκλεοτίδια, εξηγεί καλύτερα από κάθε άλλον τρόπο την ιδιαίζουσα φύ- ση των βιολογικών βλαβών από ακτινοβολίες.

Κατά την ακτινοβόληση μορίων - στόχων χρησιμοποιείται ο δείκτης G που καθορίζει τον αριθμό των μορίων που σχηματίσθηκαν η αλλοιώθηκαν για κάθε 100εν ακτινοβολίας X .

Πίνακας τιμών δείκτη ευαισθησίας G

Συνένζυμο A	9,2	AMP.....	0,161
Αλκοολική αφυδρογονάση	3,4	Αδενοσίνη.....	0,161
NADH.....	1,7	Κατάλυση	0,009
Αδενίνη	0,676	RNA	0,0072
Καρβοξυεπεπτάση.....	0,55	DNA.....	0,0039

Όπως βλέπουμε πολύπλοκα ενζυμικά συστήματα είναι συνήθως πύο ευαίσθητα από απλά μόρια, π.χ. συνένζυμο A σε σχέση με AMP.

4.1.3. Ραδιοευαισθησία κυτταρικών συστατικών.

Η επίδραση ιονίζουσας ακτινοβολίας στα χρωμοσώματα μπορεί να επιφέρει πολλές και καταστρεπτικές επιπτώσεις στα κύτταρα και σε προέκταση στον οργανισμό. Αυτό δικαιολογεί και τη μεγαλύτερη ευαισθησία των πυρήνων των κυττάρων απέναντι στην ακτινοβολία, σε σύγκριση με το κυτταρόπλασμα. Έχει βρεθεί, π.χ. πως ένα σωματίδιο α είναι ικανό να προκαλέσει θανάτωση του κυττάρου όταν το σωματίδιο αυτό οδηγηθεί στον πυρήνα, ενώ για τον ίδιο σκοπό με ακτινοβόληση όμως μόνο του κυτταροπλάσματος απαιτούνται *τριάντα δύο χιλιάδες* σωματίδια α. Η παραπάνω παρατήρηση έγινε δυνατή με τη χρησιμοποίηση μικροδέσμης που γίνεται με ραδιοϊσότοπα (π.χ. πλουτόνιο - 210). Τα σωματίδια α που έτσι παράγονται έχουν εμβέλεια μόλις 40μm αλλά μεγάλο ειδικό ιονισμό (βλ. κεφ. 2.3). Μιά άλλη μέθοδος είναι η γνωστή «μικροχειρουργική» με την οποία μπορούμε να αφαιρέσουμε πυρήνα από κύτταρο και να τον ξαναβάλουμε πίσω ζωντανό. Έτσι μπορούμε να ακτινοβολήσουμε τον πυρήνα ή το κυτταρόπλασμα μεμονωμένα. Με πειράματα τριτωμένης θυμιδίνης (που ενσωματώνεται στο DNA κατά την αντιγραφή) μπορούμε ακόμα να ελέγξουμε την ευαισθησία του πυρήνα (τα σωματίδια β της ^3H - Thy έχουν εμβέλεια μόλις 1 - 2 μm), έτσι ώστε όλη η ενέργειά τους παραμένει και απορροφάται στο χώρο του πυρήνα. Πειράματα που έγιναν με ραδιενεργή και με μη ραδιενεργή θυμιδίνη έδειξαν πειστικά τη δράση των σωματιδίων - β στην αλλοίωση των γονιδίων.

Από τα οργανίδια, φαίνεται πως τα λυσοσώματα χάνουν υδρολυτικά ένζυμα όταν με την ακτινοβόληση αλλοιωθεί η μεμβράνη τους, ενώ τα μιτοχόνδρια για τον ίδιο λόγο δείχνουν ελάττωση της οξειδωτικής φωσφορυλίωσης, ενώ ακόμα παρατηρείται διαρροή ATP στον εξωτερικό χώρο.

Επιπτώσεις σε πρωτεΐνες και σε μεμβράνες

Η ρίζα OH· αντιδρά εύκολα με τα αρωματικά αμινοξέα (π.χ. τυροσίνη) καθώς και με τα θειούχα (π.χ. μεθειονίνη, κυστεΐνη), τα οποία αντιδρούν επίσης και με

το ενυδατωμένο ηλεκτρόνιο. Η άμεση όμως επίδραση ακτινοβολίας επηρεάζει κυρίως το α - άτομο άνθρακα. Η απαιτούμενη δόση για αλλοίωση της δράσης απομονωμένων ενζύμων είναι της τάξης των 10Gy δηλ. 10 φορές περισσότερο από ό,τι συμβαίνει με ολόκληρα κύτταρα. Εξ αιτίας όμως της συνεχούς ανακύκλωσης/ανασύνθεσης των ενζύμων η καταστροφή τους δεν έχει σημαντικές επιπτώσεις στη ζωή των κυττάρων με εξαίρεση βέβαια τις πρωτεΐνες εκείνες που ενδεχόμενα βρίσκονται σε πολύ λίγα αντίτυπα και δεν ανακυκλώνονται. Οι ινώδεις πρωτεΐνες επίσης επηρεάζονται σημαντικά και ιδιαίτερα το σύστημα ακτομοσίνης στον καρδιακό μύ.

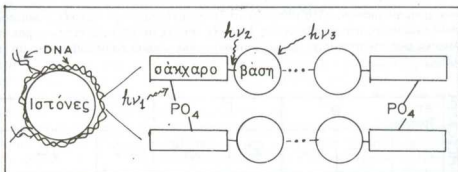
Η λειτουργία των μεμβρανών, συμπεριλαμβανομένης της πρωτεϊνοσύνθεσης στο ενδ. δίκτυο, της φωτοσύνθεσης και της αντλίας K - Na δεν επηρεάζονται εύκολα αφού χρειάζονται περίπου 100 Gy για να βρεθούν αλλοιώσεις. Αντίθετα η οξειδωτική φωσφορυλίωση είναι πολύ ευαίσθητη, ίσως λόγω της ευαισθησίας της ATP συνθετάσης. Σε κύτταρα θύμου αδένου έχει παρατηρηθεί σημαντική ελάττωση φωσφορυλίωσης με δόση μόλις 0,25 Gy. Παρόμοια ευαισθησία παρουσιάζει το κεντρικό νευρικό σύστημα.

Επιπτώσεις σε νουκλεϊνικά οξέα

Η άμεση επίδραση φωτονίων ιονίζουσας ακτινοβολίας μπορεί να προκαλέσει α) σπάσιμο του ενός κλώνου (συνήθως στο φωσφοδιεστερικό δεσμό) σύμφωνα και με την περίπτωση της «απλής προσβολής» της θεωρίας του στόχου, ή β) σπάσιμο και των δύο κλώνων οπότε αν η απόσταση ανάμεσα στις δύο θραύσεις είναι μικρή παρατηρείται σπασμένο χρωμόσωμα κατά τη ζύτωση (περίπτωση πολλαπλής προσβολής). Το σπάσιμο του DNA μπορεί να ανιχνευτεί (εκτός από κυτταρολογικά) και με φυσικοχημικές μεθόδους και ιδιαίτερα με μέτρηση ιξώδους, αφού το ιξώδες άθικτων μορίων DNA είναι μεγαλύτερο από εκείνο σπασμένων μορίων. Έχει ακόμα βρεθεί πως οι βάσεις πυριμιδίνης (θυμίνη, ουρακίλη, κυτοσίνη) είναι 100 φορές πιο ευαίσθητες από τις πουρίνες (γουανίνη, αδενίνη). (Παρόμοια ευαισθησία συμβαίνει και με υπεριώδη ακτινοβολία οπότε σχηματίζονται διμερή θυμίνης που ξαναδιασπώνται μετά από επίδραση με ορατή ακτινοβολία).

Η έμμεση επίδραση οφείλεται στις ασταθείς «ελεύθερες ρίζες» (βλ. κεφ. 2.3.5. και 3.4.) κατά την οποία οι αντιδράσεις του DNA με αυτές και ιδιαίτερα με τα αρχικά «ξηρά» προϊόντα της ακτινοβόλησης (H_2O^+ και e^-) μπορούν να δημιουργήσουν βλάβες.

Υπάρχουν ενδείξεις ότι λειτουργούν «διορθωτικοί μηχανισμοί», οι οποίοι με τη βοήθεια κατάλληλων ενζύμων επιδιορθώνουν τις βλάβες αρκεί να μην είναι και στους δύο κλώνους του DNA ταυτόχρονα οπότε επέρχεται ρήξη της διπλής έλικας (αν και αναμένεται κάποια συγκράτηση από τις ιστόνες) (εικ. 59). Ανάλογα με το είδος της ακτινοβολίας γίνεται απλή θραύση (δηλ. του ενός κλώνου DNA) ή διπλή. Π.χ. σωματίδια - α με υψηλή τιμή LET έχουν μεγάλες πιθανότητες να προκαλέσουν διπλή θραύση αφού η απώλεια ενέργειας ανά μμ είναι πολύ μεγα-



Εικ. 59: Πιθανές θέσεις προσβολής DNA από φωτόνια ή σωματίδια ιονίζουσας ακτινοβολίας, οπότε μπορεί να γίνει θραύση του κορμού ή της σύνδεσης βάσης με κορμό καθώς και αλλοίωση βάσης. Σε περιπτώσεις θραύσης και των δύο κλώνων μπορεί να γίνει μόνιμο σπάσιμο του μορίου. Αριστερά διακρίνονται νουκλεόσωμα με τις ιστονές και το περιελλινόμενο DNA.

λύτερη από εκείνη των φωτονίων X ή γ (βλ. κεφ. 2.3.) Η θραύση του δεσμού σακχάρου - φωσφορικής ομάδας μπορεί και επιδιορθώνεται με ειδικό ένζυμο (DNA - λιγάση), ενώ η απώλεια βάσης λόγω θραύσης του ομοιοπολικού δεσμού της με τη δεσοξυριβόζη, αναπληρώνεται με DNA πολυμεράση χρησιμοποιώντας τον άλλο κλώνο σαν πρότυπο.

Τέλος αν συμβεί αλλοίωση μιας βάσης τότε λειτουργεί περισσότερο πολύπλοκος μηχανισμός που περιλαμβάνει: α) «αναγνώριση» της περιοχής από μια ενδονουκλεάση που κόβει τον κλώνο, β) απομάκρυνση της αλλοιωμένης βάσης με μια εξωνουκλεάση γ) σύνθεση νέου συμπληρωματικού τμήματος κλώνου με τη βοήθεια DNA - πολυμεράσης χρησιμοποιώντας τον άλλο κλώνο σαν πρότυπο και δ) σύνδεση του νέου κλώνου με τον παλιό με τη βοήθεια DNA - λιγάσης. Για όλη αυτή τη διαδικασία απαιτείται κάποιος χρόνος γι' αυτό και η ακτινοβόληση κυττάρων με αργό ρυθμό δόσεων δίνει την ευκαιρία για επιδιορθώσεις. Είναι βέβαια αναμενόμενο πως αν η ακτινοβολία προσβάλει και τους δύο κλώνους ταυτόχρονα και μάλιστα στην ίδια θέση τότε η επιδιόρθωση δεν μπορεί να γίνει με ακρίβεια αφού δεν υπάρχει πρότυπο. Αυτές ακριβώς οι θραύσεις ακολουθούμενες από λανθασμένη προσθήκη - αντικατάσταση βάσεων οδηγούν σε μεταλλαγές που μεταδίδονται στους απογόνους (αν γίνουν σε γεννητικά κύτταρα) ή προκαλούν καρκινογένεση στο ίδιο άτομο (αν γίνουν σε σωματικά κύτταρα).

Όσο τελικά αυτές οι αλλαγές είναι *αθροιστικές* αφού συσσωρεύονται στο γονιδίωμα και είναι ιδιαίτερα επιβλαβείς σε άτομα αναπαραγωγικής ηλικίας. Εκτός όμως από την παραπάνω διαδικασία επίδρασης ακτινοβολίας σε DNA, είναι δυνατή η ολοκληρωτική θραύση του που έχει σαν επακόλουθο τη σύρραψή του σε άλλο σημείο (χρωμοσωμική εκτροπή - chromosomal aberration) (βλ. εικ. 60). Η χρωμοσωμική εκτροπή ανιχνεύεται μικροσκοπικά (βλ. εικ. 61), ενώ οι μεταλλαγές δεν γίνονται άμεσα αντιληπτές αφού δεν προκαλούν ορατές αλλοιώσεις

των χρωμοσωμάτων, αλλά μπορούν να δημιουργήσουν λειτουργικές ή μορφολογικές ανωμαλίες στους απογόνους. Μερικές τέτοιες μεταλλαγές έχουν χαρακτηριστικούς φαινότυπους (π.χ. χρώμα ματιών) χωρίς καμιά επιβλαβή επίπτωση (εικ. 62).

ΑΝΑΦΑΣΗ • ΜΕΤΑΦΑΣΗ • ΜΕΣΟΦΑΣΗ	Απλή θραύση	Β		Γ		Δ	
	τελική έλλειψη	ενδιάμ.	παρακ. αναστροφή	περικ.	έλλειψη + δακτύλιοι	μετατοπίσεις	δικεντριά + ελλείψεις

Εικ. 60: Διαδοχή των πιθανών γεγονότων μετά από προσβολή χρωμοσωμάτων από ακτινοβολία ή σωματίδιο. Αυτό μπορεί να συμβεί πριν, κατά τη διάρκεια ή και μετά το διπλασιασμό τους. Οι περιπτώσεις Β, Γ και Δ απαιτούν διπλές θραύσεις DNA.



Εικ. 61: Θραύση χρωμοσωμάτων (βέλος) μετά την επίδραση ακτινοβολίας.



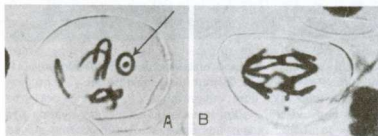
Forked-Dichate-Rudimentary-Vestigial-Curled-Stubble-Miniature

Εικ. 62: Μεταλλαγμένα στελέχη του εντόμου *Drosophila* μετά από ακτινοβόληση με ακτίνες-X.

4.2. Ραδιοευαισθησία των χρωματοσωμάτων

Οι σημαντικότερες ορατές μεταβολές, που εμφανίζονται στα κύτταρα, όταν αυτά δεχθούν ορισμένη δόση ακτινοβολίας, αφορούν στον πυρήνα τους και μάλιστα στα χρωμοσώματα. Οι σχηματισμοί αυτοί είναι σχεδόν πάντοτε ορατοί μόνο κατά την περίοδο της *μιτωτικής διαίρεσης του κυττάρου*, με την οποία, όπως είναι γνωστό επιτελείται ο πολλαπλασιασμός του.

Οι μεταβολές από ιονίζουσες ακτινοβολίες είναι άλλοτε παροδικές και άλλοτε μόνιμες, αυτό δε εξαρτάται από την ολική δόση και από το ρυθμό δόσης της ακτινοβολίας. Το συχνότερο χρησιμοποιούμενο υλικό για πειραματική μελέτη του θέματος τούτου είναι η γύρη ορισμένων φυτών και ιδίως του γένους *Tradescantia*, στο οποίο και αναφέρονται τα παρακάτω πειράματα (εικ. 63).

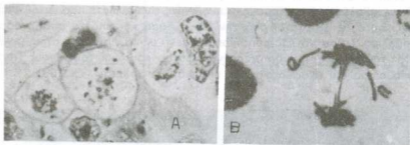


Εικ. 63: Χρωμοσωμικές ανωμαλίες σε γυρεόκοκκους *Tradescantia* μετά από ακτινοβόληση με 300 R. Α: Κυκλικό χρωμόσωμα, Β: Αλληλοσύνδεση χρωμοσωμάτων.

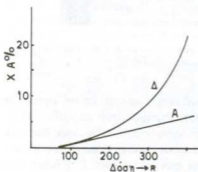
Η χορήγηση 50 r σε ρυθμό δόσεως 0,1 r ανά λεπτό καμιά ορατή μεταβολή δεν προκαλεί στα κύτταρα της γύρης. Η ίδια δόση χορηγούμενη σε ρυθμό 0,5 r ανά λεπτό προκαλεί *γλοιοποίηση των χρωματοσωμάτων* στα 50% των διαιρούμενων κυττάρων της γύρης. Κατά αυτήν τα χρωματοσώματα εμφανίζουν γλοιώδη σύσταση και δίνουν την εντύπωση ότι είναι συγκολλημένα. Στη δόση των 100 r με ρυθμό παροχής 0,5 r ανά λεπτό εμφανίζονται επί πλέον *ανωμαλίες της σπείρωσης των χρωμονημάτων και ρήξεις στην περιοχή των κεντρομεριδίων*. Αν διατηρουμένου του ρυθμού δόσης αυξηθεί η ολική δόση σε 150 r, τότε εμφανίζονται και ανωμαλίες στο σχηματισμό της ατράκτου. Όλες οι παραπάνω μεταβολές εμφανίζονται κατά το πλείστον πολύ γρήγορα μετά την ακτινοβόληση (το πολύ μετά 7 ώρες) και δεν διαρκούν παρά μόνο λίγες ώρες. Παρ' ότι οι μεταβολές αυτές δεν προκαλούν καμιά μόνιμη αλλοίωση (μεταλλαγή) εν τούτοις είναι δυνατόν καμιά φορά να οδηγήσουν σε θάνατο του κυττάρου.

Η χορήγηση δόσης 200 r σε ρυθμό 0,1 r ανά λεπτό προκαλεί αύξηση της *συχνότητας των μιτωτικών διαιρέσεων* κατά 38 - 67%, ενώ η ίδια δόση χορηγούμενη σε ρυθμό 0,5 r ανά λεπτό προκαλεί *αστατολή των μιτώσεων*, η οποία εμφανίζεται 5 ώρες μετά τη λήξη της ακτινοβόλησης και διαρκεί περί τις 4 ώρες.

Εκτός από τις παραπάνω παροδικές μεταβολές, οι ιονίζουσες ακτινοβολίες μπορούν να προκαλέσουν και μόνιμες αλλοιώσεις των κυττάρων που εκδηλώνονται με μορφή *θραύσεων των χρωματοσωμάτων ή των χρωματιδίων* (εικ. β). Για την πρόκληση των θραύσεων αυτών μεγαλύτερη σημασία έχει η διάρκεια της ακτινοβόλησης (αν αυτή έχει μικρή ένταση) παρά η ολική δόση. Γενικά ο αριθμός των θραύσεων αυξάνει με το ρυθμό της δόσης (εικ. 65).



Εικ. 64: Θραύσεις χρωμοσωμάτων σε καρκινικά κύτταρα μετά από Ραδιοθεραπεία (Α) και σε κύτταρα *Vicia faba* με ακτινοβόληση 132 R (Β).



Εικ. 65: Σχέση ανάμεσα στη δόση της ακτινοβολίας και στο ποσοστό χρωμοσωμικών ανωμαλιών (X.A.) για απλές (Α) και για διπλές (Δ) θραύσεις. (Μικρά LET).

Οι θραύσεις γίνονται τυχαία σε ένα οποιοδήποτε σημείο του χρωματοσώματος ή του χρωματιδίου, ακολουθούνται δε ή από πλήρη ανασύνδεση των θραυσμάτων, οπότε επέρχεται ανασυγκρότηση της δομής, όπως αυτή ήταν προ της θραύσης, ή απομόνωση των θραυσμάτων, που παραμένουν σαν θραύσματα, ή από συνδέσεις ομοειδών ή ετεροειδών θραυσμάτων μεταξύ τους, οπότε δημιουργούνται ενώσεις μεταξύ αδελφών ή και ξένων χρωματιδίων (εικ. 66).

Η θραύση είναι δυνατόν να συμβεί κατά τη μεσόφαση και πριν τη διαίρεση του χρωματοσώματος σε δύο χρωματίδια, οπότε θα ακολουθήσει ή ανασύνδεση των δύο θραυσμάτων πριν τη διαίρεση του χρωμοσώματος και πλήρης επιδιόρθωση της βλάβης ή διαίρεση καθ' ενός από τα θραύσματα σε χρωματίδια. Τα θραύσματα αυτά των χρωματιδίων ή θα επανασυνδεθούν και τα δύο και θα έ-

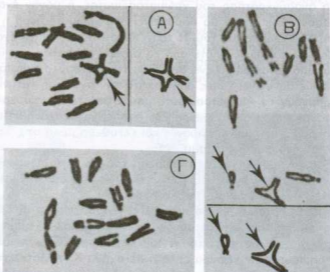
χουμε πλήρη ανασυγκρότηση του χρωματοσώματος, ή μόνον ένα ζευγάρι από αυτά θα ανασυνδεθεί, οπότε θα παραμείνει στο χρωματοσώμα η θραύση ενός μόνον από τα δύο χρωματίδιά του. Η τρίτη δυνατότητα είναι να έχουμε σύνδεση των αδελφών χρωματιδίων, οπότε από το αρχικό χρωματοσώμα θα προκύψουν δύο τμήματα, από τα οποία το ένα θα στερείται κεντρομεριδίου (ακεντρικό τμήμα) και συνεπώς θα μείνει χωρίς οδηγό κατά την ανάφαση (τα ινίδια της ατράκτου συλλαμβάνουν τα χρωματοσώματα μόνον από το κεντρομερίδιο) (εικ. 67). Ως εκ τούτου το τμήμα αυτό, επειδή δεν μπορεί να μετακινηθεί προς τους πόλους του κυττάρου, παραμένει αδρανές και ελεύθερο μέσα στο κυτταρόπλασμα (εικ. 64, 67) ή στο πυρηνόπλασμα.

Αν η θραύση επέλθει μετά τη διαίρεση του χρωματοσώματος σε χρωματίδια, τότε είναι δυνατόν αυτή να αφορά το ένα ή και τα δύο χρωματίδια, οι συνέπειες δε αυτές θα είναι όμοιες με τις παραπάνω.

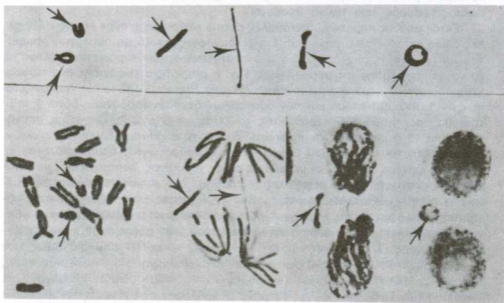
Σε περίπτωση κατά την οποία η θραύση γίνεται σε δύο ομόλογα χρωματοσώματα είναι δυνατόν να έχουμε σύνδεση των χρωματιδίων του ενός χρωματοσώματος μετά των χρωματιδίων του άλλου, οπότε μεταξύ των ομολόγων χρωματοσωμάτων δημιουργείται γέφυρα απλή ή σε σχήμα Χ. Άλλοτε έχουμε σύνδεση μεταξύ των κεντρικών θραυσμάτων δύο ομολόγων χρωματοσωμάτων και αντίστοιχη ένωση των ακεντρικών θραυσμάτων αυτών. Στην περίπτωση αυτή δημιουργείται ένα δικεντρικό χρωματοσώμα (που έχει δύο κεντρομερίδια), του οποίου το καθένα κεντρομερίδιο έλκεται προς κάθε ένα από τους πόλους του κυττάρου, με αποτέλεσμα το τέντωμα του χρωματοσώματος και τη δημιουργία μακράς γέφυρας, που τελικά θραύεται.

Εκτός από τις παραπάνω μεταβολές είναι δυνατόν να έχουμε και ποικίλες άλλες όπως μετατοπίσεις, απλές και διπλές συνάψεις μεταξύ μη ομολόγων χρωματοσωμάτων κ.α. Η συχνότητα των ανακατατάξεων αυτών κυμαίνεται ανάλογα με το ρυθμό της δόσης της ακτινοβολίας. Π.χ. η συχνότητα εμφάνισης δικεντρικών χρωμοσωμάτων στον άνθρωπο είναι 2% ανά Sievert (100 rem). Υπολογίζεται πως αν 1.000.000 άτομα και των δυο φύλων δεχθούν ισοδύναμη δόση 1 mSv τότε θα προκληθούν 15 περιπτώσεις χρωμοσωμικών ανωμαλιών στους απογόνους τους (6 περιπτώσεις αν πρόκειται για μεικτό πληθυσμό όλων των ηλικιών, αφού ~40% του πληθυσμού βρίσκεται σε αναπαραγωγική δραστηριότητα).

Είναι φανερό ότι όλες οι μεταβολές αυτές (θραύσεις, ανασυνδέσεις και ανακατατάξεις) συνεπάγονται μεταβολές της δομής των χρωματοσωμάτων. Δεδομένου δε ότι τα χρωματοσώματα έχουν την ικανότητα να διπλασιάζονται, κάθε μόνιμη μεταβολή της δομής τους διαιωνίζεται επ' άπειρον, μεταβιβαζόμενη στα θυγατρικά κύτταρα και γενικότερα στους απογόνους του οργανισμού, που έτσι εμφανίζουν νέες κληρονομικές ιδιότητες (νοσηρές ή μη). Η σημασία όμως των *χρωμοσωμικών* αυτών *εκτροπών* είναι περιορισμένη, διότι οι περισσότερες από τις σημαντικές μεταβολές της δομής των χρωματοσωμάτων οδηγούν σε εκφύλιση των κυττάρων, ολίγες δε μόνο συμβάλλουν στη γένεση των ιδιοποικίλιων των οργανισμών, που κατά το πλείστον οφείλονται σε μη ορατές, μικρότατες μεταβολές των γονιδίων (*γονιδιακές μεταλλάξεις*). Τούτο αποδεικνύεται εξ άλλου από το γεγονός, ότι ο ρυθμός της δόσης μιας ακτινοβολίας, επηρεάζει τη συ-



Εικ. 66: Επανασυνδέσεις χρωσωμάτων μετά από ακτινοβόληση. (Α, Β, βέλη). Γ: Φυσιολογική μίτωση.



Εικ. 67: Ακεντρικά χρωσωμικά τμήματα (χωρίς κεντρομερίδιο) μετά από ακτινοβόληση σε κύτταρα *Vicia faba*. Τα χρωσωμάτα αυτά δεν καταλήγουν σε πυρήνα (βέλη).

χνότητα των ορατών χρωματοσωμικών ανωμαλιών, και καθόλου δεν τροποποιεί τη συχνότητα των μεταλλαγών. Αυτή δε η τελευταία εξαρτάται από την ολική δόση της ακτινοβολίας.

Το ότι και η θανατηφόρος επίδραση μιας ακτινοβολίας πάνω στα κύτταρα δεν βρίσκεται σε απόλυτη σχέση αιτίας και αποτελέσματος με τη θραύση των χρωματοσωμάτων, αποδεικνύεται από το ότι ο ειδικός ιονισμός των διαφόρων ακτινοβολιών δεν επηρεάζει ομοιότροπα τη θνησιμότητα των κυττάρων και τη συχνότητα των θραύσεων των χρωματοσωμάτων.

Ο μηχανισμός της θραύσης των χρωματοσωμάτων δεν φαίνεται να είναι απλός. Κατ' αρχήν η πρόκρουση ενός ιονίζοντος σωματιδίου επί ενός χρωμοσώματος δεν μπορεί να συγκριθεί με τη θραύση ενός σύρματος από μια σφαίρα. Το γεγονός, ότι η ευαισθησία των χρωματοσωμάτων μπορεί να τροποποιηθεί (ελαττωθεί) με μια πρώτη έκθεση των κυττάρων σε ιονίζουσα ή υπέρυθρο ακτινοβολία, αποδεικνύει ότι οι μεταβολές των χρωματοσωμάτων δεν οφείλονται απλά στη δίοδο του ιονίζοντος σωματιδίου, αλλά είναι αποτέλεσμα συμβολής διαφόρων παραγόντων.

Ορισμένες πειραματικές παρατηρήσεις συνηγορούν υπέρ της άποψης, ότι οι μεταβολές των χρωμοσωμάτων είναι μάλλον αποτέλεσμα έμμεσης δράσης των ιονίζουσών ακτινοβολιών. Έτσι, οι έχουσες υψηλό ειδικό ιονισμό ακτινοβολίες προκαλούν ευκολότερα θραύσεις των χρωματοσωμάτων παρά οι ακτίνες Χ και γ. Π.χ. μία δόση σωματίων α ενεργείας 5 MeV μπορεί να είναι δέκα ή είκοσι φορές αποτελεσματικότερη από τις ακτίνες Χ της ίδιας ενέργειας. Τούτο αποδεικνύει, ότι οι θραύσεις των χρωματοσωμάτων δεν οφείλονται σε αδρανοποίηση ενζύμων ή αλλοίωσή μακρομορίων λόγω άμεσης δράσης της ακτινοβολίας, διότι, θα έπρεπε οι έχουσες μικρό ειδικό ιονισμό ακτινοβολίες να είναι αποτελεσματικότερες από εκείνες με υψηλό ειδικό ιονισμό. Ως εκ τούτου δεχόμαστε, ότι η δράση των ακτινοβολιών επί των κυττάρων είναι κυρίως έμμεση, δηλαδή ότι οι διάφορες μεταβολές προκαλούνται λόγω δράσης των *ελευθέρων ριζών*. Είναι φανερό, ότι μία υψηλή τοπική συγκέντρωση ελευθέρων ριζών, προκαλούμενη από ακτινοβολίες που έχουν υψηλό ειδικό ιονισμό, είναι αρκετή για να εξαρθώσει ένα οργανωμένο δομικό συγκρότημα ή να διασπάσει μακρομόρια. Δεν αποκλείεται βέβαια μια τέτοια δράση των ελευθέρων ριζών να εκτείνεται και επί των ενζύμων εκείνων, που είναι απαραίτητα για τη σύνθεση (αντιγραφή) του DNA που αποτελεί δομικό συστατικό των χρωματοσωμάτων. η ακόμα και επί της ενεργοποίησης ογκογονιδίων, πράγμα που εξηγεί την καρκινογόνο δράση των ακτινοβολιών αυτών.

Το γεγονός, ότι οι λόγω επίδρασης μιας ιονίζουσας ακτινοβολίας εμφανιζόμενες ορατές μεταβολές του κυττάρου εντοπίζονται κυρίως στον πυρήνα, δείχνει ότι ο πυρήνας είναι πιο ευαίσθητος στις ακτινοβολίες, ενώ το κυτταρόπλασμα είναι ανθεκτικότερο. Όμως πυρήνες μη ακτινοβοληθέντες που τοποθετούνται μέσα σε ακτινοβολημένο κυτταρόπλασμα εμφανίζουν όλες τις χαρακτηριστικές ραδιοβλάβες με μόνη εξαίρεση τη θραύση των χρωματοσωμάτων. Ακόμα αν με τη βοήθεια μικροσιφωνίου ενέσουμε περίπου 0, 0001 κυβ. χιλ. κυτταροπλάσματος, προερχομένου από κύτταρα ακτινοβοληθέντα προ 5 - 7 ημερών, μέσα στο κυτ-

ταρόπλασμα φυσιολογικού ωοκυττάρου (κοντά στον πυρήνα του) τότε ο μη ακτινοβολημένος πυρήνας εμφανίζει μέσα σε 1 - 2 ώρες όλα τα στάδια μιας πλήρους ραδιοβλάβης, δηλαδή ρήξη του πυρηνίσκου, πύκνωση, εμφάνιση κενωτών και θραύση χρωματοσωμάτων. Από τα παραπάνω πειράματα καταφάνεται η σημασία του κυτταροπλάσματος στην εμφάνιση ορατών μεταβολών του κυττάρου.

Συμπερασματικά, η ιονίζουσα ακτινοβολία προκαλεί θραύσεις στο DNA καθώς και αλλοιώσεις στις βάσεις πουρίνης και πυριμιδίνης που είναι τελικά υπεύθυνες για τη ροή των πληροφοριών στο ίδιο κύτταρο αλλά και στους απογόνους. Εντατικά πειράματα σχέσης ανάμεσα σε δόση και σε αποτελέσματα που έχουν γίνει στο Δίπτερο *Drosophila melanogaster* έχουν δείξει ότι το αποτέλεσμα ως προς την πρόκληση μεταλλαγών (αλλοιώσεων των πληροφοριών DNA) είναι ανεξάρτητο του ρυθμού της δόσης με την οποία δίνεται η ακτινοβολία. Αυτό σημαίνει ότι οι δόσεις είναι *αθροιστικές* ως προς τις γενετικές επιπτώσεις της ιονίζουσας ακτινοβολίας. Η δόση με την οποία γίνεται διπλασιασμός των μεταλλαγών που συμβαίνουν από φυσικές αιτίες, για τον άνθρωπο, είναι 0,5 Gy. Αυτό βέβαια σημαίνει ότι σε διάρκεια 30 χρόνων (όσο δηλ. είναι μια γενιά) δεν θα πρέπει ο άνθρωπος να δεχθεί το ποσόν αυτό της ισοδύναμης δόσης (0,5Gy). Πάντως πρόσφατα πειράματα σε επίμυες όπου έχει ελαττωθεί ο ρυθμός δόσης κατά 10^4 , έχουν δείξει ότι γίνεται ελάττωση των αναμενόμενων μεταλλαγών κατά 2 - 3 φορές, πράγμα που σημαίνει ύπαρξη κάποιων επιδιορθωτικών διεργασιών και στην περίπτωση των γενετικών επιπτώσεων.

4.3. Επιπτώσεις στο κυτταρικό επίπεδο

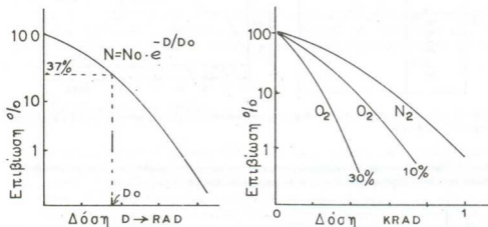
Οι μοριακές και μακρομοριακές μεταβολές που είδαμε να συμβαίνουν με την επίδραση ιονίζουσας ακτινοβολίας, επηρεάζουν τη γενικότερη λειτουργία των κυττάρων αναπτύσσοντας ανωμαλίες που μπορούν να γίνουν αντιληπτές με το μικροσκόπιο (οπτικό ή ηλεκτρονικό) ή ακόμα και μακροσκοπικά.

4.3.1. Καμπύλες επιβίωσης

Η ακτινοβόληση κυττάρων και οργανισμών συνήθως παρακολουθείται από παρατηρήσεις που οδηγούν στη χάραξη «καμπύλης επιβίωσης» (εικ. 6B). Αυτή μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση (βλ. επίσης κεφ. 3.2.1.): $N = N_0 \cdot e^{-D/D_0}$, όπου N_0 , ο αρχικός αριθμός κυττάρων, N , ο αριθμός κυττάρων που έχουν επιβιώσει μετά από δόση D και e είναι η βάση των φυσικών λογαρίθμων (2,7). Εάν $D = D_0$, τότε $N = N_0 \cdot e^{-1}$ δηλ. $N = 0,37N_0$. Κατά συνέπεια D_0 , είναι η δόση που απαιτείται για μείωση του αριθμού των κυττάρων στο 37% του αρχικού.

Η καμπύλη αυτή τροποποιείται όταν στο δείγμα υπάρχουν ενώσεις ή μόρια που τροποποιούν τη ραδιοευσαισθησία, όπως είναι το οξυγόνο ή το άζωτο (εικ.

69). Τέτοιες ουσίες «ραδιοευαισθητοποιείς» (radiosensitizers) μπορούν να επιδράσουν α) πριν (π.χ. ουσίες συγχρονισμού κυτταροδιαιρέσεων), β) κατά τη διάρκεια (π.χ. ουσίες παρέμβασης στο σχηματισμό ελευθέρων ριζών) και γ) μετά την ακτινοβολήση (π.χ. ουσίες παρεμπόδισης επανορθωτικών διαδικασιών).



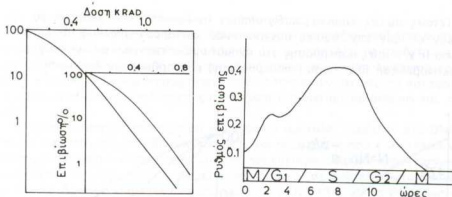
Εικ. 68: Καμπύλη επιβίωσης κυττάρων μετά από ακτινοβολήση. Η δόση D_0 προκαλεί απώλεια 63% του αρχικού αριθμού των κυττάρων αφού $N = N_0 \cdot e^{-D/D_0}$ και για $D = D_0$ έχουμε $N = N_0 \cdot e^{-1}$ (βλ. κείμενο για λεπτομέρειες).

Εικ. 69: Τροποποίηση των καμπυλών επιβίωσης με οξυγόνο (O_2) και άζωτο (N_2).

Η χάραξη «καμπύλης επιβίωσης» κατά διαδοχικές ακτινοβολήσεις δείχνει ότι, σε χαμηλές τουλάχιστον δόσεις η καμπύλη επαναλαμβάνεται με την ίδια κλίση· αυτό δείχνει ότι τα κύτταρα δεν έχουν υποστεί ανεπανόρθωτες βλάβες κατά την πρώτη ακτινοβολήση (εικ. 70).

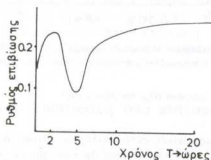
Μετά από επίδραση μεγάλης δόσης π.χ. 100 Gy, όλα τα κύτταρα πεθαίνουν λόγω βλάβης του μεταβολισμού τους. Σε αναπαραγόμενα όμως κύτταρα η ευαισθησία είναι μεγαλύτερη όσο μακρότερη η διάρκεια μίτωσης και όσο μικρότερη η μορφολογική και λειτουργική διαφοροποίησή τους. Τα ακτινοβοληθέντα κύτταρα θεωρούνται ότι επέζησαν αν περάσουν 5 έως 6 διαδοχικές διαιρέσεις.

Συμπεραίνεται ότι αφού οι σχέσεις δόσης - αποτελέσματος είναι διαφορετικές για κάθε φάση του κυτταρικού κύκλου (εικ. 71) θα πρέπει να θεωρηθεί ότι υπάρχουν διαφορετικοί μηχανισμοί δράσης. Ακόμα είναι γνωστό πως αν η συνολική δόση χωριστεί σε δύο ίσες που δίνονται κατά διαστήματα, τότε οι βλαβερές επιπτώσεις είναι πολύ μικρότερες (ανάλογα και με τη χρονική απόσταση ανάμεσα στις δόσεις (εικ. 72) πράγμα που υποδηλώνει την ύπαρξη επιδιορθωτικών διεργασιών.



Εικ. 70: Για χαμηλές δόσεις η επανάληψη της ακτινοβόλησης έχει σαν αποτέλεσμα τη χάραξη ίδιας καμπύλης επιβίωσης.

Εικ. 71: Ραδιοευαισθησία των διαφόρων φάσεων του κυτταρικού κύκλου απέναντι στην επίδραση ιονίζουσας ακτινοβολίας. Διακρίνεται η διαφορά ευαισθησίας $M > G_2 > G_1 > S$.



Εικ. 72: Διάγραμμα που δείχνει την ευνοϊκή επίδραση του χρόνου T ανάμεσα σε δύο ακτινοβολήσεις ως προς τις τελικές επιπτώσεις (δόση 1,5 Gy). (Στην καμπύλη αυτή είναι βέβαια δύσκολο να εξηγηθεί η επαναφορά της αρχικής ευαισθησίας σε χρόνους 5-10 ώρες ανάμεσα στις ακτινοβολήσεις).

4.3.2. Κυτταρικός μετασχηματισμός (cell transformation)

Ο μετασχηματισμός φυσιολογικών κυττάρων δηλαδή η μετάπτωσή τους σε καρκινικά όπου παρατηρείται διαρκής πολλαπλασιασμός τους, έχει πολλές αιτίες μεταξύ των οποίων συμπεριλαμβάνεται και η επίδραση ιονίζουσας ακτινοβολίας. Με αυτή πραγματοποιείται κατ' αρχάς αλλοίωση στο γονιδιακό υλικό (ενεργοποίηση ογκογονιδίων;) που με τη σειρά της τροποποιεί τους μηχανισμούς «αναστολής αύξησης εξ' επαφής» (π.χ. μέσω αλλοίωσης των μεμβρανικών πρωτεϊνών και των εξωκυττάρων ουσιών) που έχει σαν τελικό αποτέλεσμα τη διαρκή αύξηση και διαίρεση του κυττάρου. Αν και λεπτομέρειες της όλης πορείας δεν είναι γνωστές, εν τούτοις η συμμετοχή των «ελεύθερων ριζών» θεωρείται πολύ πιθανή κατά τα πρώτα στάδια· άλλωστε οι «ελεύθερες ρίζες» προερχόμενες από άλλες αιτίες, εκτός ακτινοβολίας (π.χ. ενζυματικά) είναι γνωστό ότι προκαλούν καρκινογένεση.

Η λανθάνουσα περίοδος από τη στιγμή της ακτινοβόλησης μέχρι την εκδήλωση των συμπτωμάτων μπορεί να διαρκέσει από 5 - 6 μέχρι 30 χρόνια (αποτελέσματα από ακτινοβόληση πληθυσμού στη Χιροσίμα και στο Ναγκασάκι). Αυτό γίνεται αντιληπτό με αύξηση του «φυσιολογικού ρυθμού» καρκινογένεσης που είναι περίπου 60.000 περιπτώσεις ανά 1.000.000 πληθυσμού για 30 χρόνια (ποσοστό 0,2% το χρόνο).

Η μέση λανθάνουσα περίοδος για εμφάνιση λευχαιμίας μετά από ακτινοβόληση με υψηλές (αλλά μη θανατηφόρες βέβαια) δόσεις, είναι περίπου 14 χρόνια, αν και πιθανολογείται ότι πάρα πολλοί παράγοντες (περιβαλλοντικοί και άλλοι) επηρεάζουν τη διάρκεια αυτή.

4.4. Επιπτώσεις σε ιστούς

Το πιο ευαίσθητο σύμπλεγμα στο σώμα των Σπονδυλόζων είναι ο *αιμοποιητικός ιστός*, που είναι υπεύθυνος για την παραγωγή των λευκοκυττάρων, των αιμοπεταλίων και των ερυθρών αιμοσφαιρίων. Η ευαισθησία του *μυελού των οστών* είναι μεγαλύτερη κατά σειρά για τον ποντικό, το κουνέλι, την κίτα, τον άνθρωπο, την κασίκα, το σκύλο. Μια ώρα μετά τη χορήγηση δόσης LD_{50} στο μυελό των οστών εκδηλώνεται ελάτωση του αριθμού των ερυθροβλαστών. Ακολουθεί νέκρωση των κυττάρων που στα 50% των πειραματόζων θα οδηγήσει στο θάνατο του οργανισμού. Η ελάτωση του αριθμού των λευκοκυττάρων και των αιμοπεταλίων διαπιστώνεται σε 3 - 4 εβδομάδες. Αν το ζώο επιζήσει, τότε ο μυελός των οστών αναγεννιέται εξ ολοκλήρου. Ανάλογη είναι και η συμπεριφορά άλλων ιστών των σπονδυλόζων όπως του σπλήνα, του στομάχου, του οισοφάγου.

Αντίθετα, η ακτινοβόληση των *ωοθηκών* και των *όρχεων* έχει ασήμαντη επίδραση στην επιβίωση του ζώου. Είναι όμως δυνατό να προκληθεί στειρώση με δόσεις που επιφέρουν ασήμαντες επιπτώσεις σε άλλους ιστούς όπως π.χ. στον αιμοποιητικό ιστό. Τα *σπερματογόνια* είναι αρκετά ευαίσθητα με τιμή $LD_{50} = 50 - 100$ γ ενώ τα *σπερματοκύτταρα* έχουν $LD_{50} = 600$ γ. Εξ άλλου τα ώριμα *σπερματοζωάρια* δεν αλλοιώνονται ακόμη και με δόσεις των 50.000 γ. Στείρωση σε θηλυκά ποντικά έχει γίνει δυνατή με μικρή δόση, της τάξης των 50γ.

Η ραδιοευαισθησία του *συκωτιού* εξαρτάται από πολλούς παράγοντες που ο σημαντικότερος είναι η διατροφή. Αν και είναι γνωστό πως ο ιστός αυτός δεν εμφανίζει μορφολογικές αλλοιώσεις με δόσεις μικρότερες από 12.000 γ, η κακή διατροφή όμως τον ευαισθητοποιεί και έτσι μπορεί να προκληθεί κύρωση με δόση μόλις 500 γ. Η επανορθωτική ικανότητα του συκωτιού μπορεί να εκδηλωθεί με επιτυχία ακόμη και μέχρι δόσεων 20.000 γ.

Ιστολογικές αλλοιώσεις έχουν παρατηρηθεί στον *εγκέφαλο* πιθήκων μετά από δόσεις 2.500 - 10.000 γ αλλά ολοκληρωτική θανάτωση επέρχεται με δόσεις 80.000γ. Ο *νωτιαίος μυελός* φαίνεται να είναι πολύ ανθεκτικός στην ακτινοβολία. Αν και χρειάζονται μεγάλες δόσεις για να προκαλέσουν ιστολογικές αλλοιώσεις

στην καρδιά, εν τούτοις παρατηρήθηκαν ηλεκτροκαρδιογραφικές αλλοιώσεις σε σκύλους μετά από σχετικά χαμηλές δόσεις. Οι αλλοιώσεις αυτές πιστεύεται πως οφείλονται σε μεταβολές της συγκέντρωσης καλίου στον ορό του αίματος και σε ελάττωση του ποσού του συμπλέγματος ακτομουσίνης.

Ο φακός του ματιού παρουσιάζεται αρκετά ευαίσθητος στη δημιουργία καταράκτη με δόσεις 15 - 30 r ακτίνων X και 1 rad νετρονίων μεγάλης ταχύτητας. Ο καταράκτης προκαλείται από κατεστραμένο κύτταρο, τα οποία συσσωρεύονται στο πίσω κεντρικό τμήμα του φακού εμποδίζοντας τη διέλευση του φωτός προς τον αμφιβληστροειδή. Ειδική εξέταση του ματιού με τη σχισμοειδή λυχνία (slit lamp) μπορεί να αποκαλύψει αρχικά στάδια καταράκτη. Αντίθετα ο αμφιβληστροειδής είναι πιο ανθεκτικός. Στον πίθηκο απαιτούνται 2.000 r για την καταστροφή των ραβδίων ενώ για την παραγωγή μορφολογικών αλλοιώσεων σε όλα τα στοιχεία του ιστού αυτού απαιτούνται 30.000 r.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, διαπιστώνουμε πως η ακτινοβολήση ενός οργανισμού προκαλεί μεγάλη ποικιλία μεταβολών σε διάφορα όργανα και ιστούς που δεν είναι δυνατόν να εξεταστούν ανεξάρτητα. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός πως η ικανότητα των ζωικών οργανισμών για προσαρμογή σε μεταβολές του περιβάλλοντος εκδηλώνεται με ποικιλία μηχανισμών και έτσι η εξήγηση των αποτελεσμάτων που παρατηρούνται στους επί μέρους ιστούς είναι πολύπλοκη αφού αυτά επηρεάζονται από τις αλλοιώσεις των άλλων ιστών. Πράγματι, η ακτινοβολία μεταβάλλει το εσωτερικό περιβάλλον του οργανισμού έτσι ώστε αυτός αναγκάζεται να προσαρμοστεί στο μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Οι προσαρμογές αυτές, που έχουν μεγάλη σημασία για την επιβίωση, ελέγχονται από το ενδοκρινές σύστημα.

4.5. Επιπτώσεις σε οργανισμούς

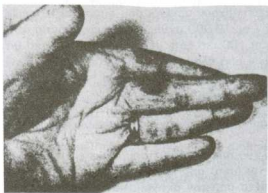
Θα μπορούσαμε να ταξινομήσουμε τις βλαβερές επιπτώσεις των ιονιζουσών ακτινοβολιών στους οργανισμούς στις εξής τέσσερις κατηγορίες:

1. Πρόκληση σωματικών μεταλλαγών που προκαλούν καρκίνους ή διάφορα άλλα συμπτώματα.
2. Πρόκληση γενετικών μεταλλαγών που επηρεάζουν τις επόμενες γενιές (αύξηση θνησιμότητας, ασθένειες κ.λπ.).
3. Επίδραση στο έμβρυο κατά τη διάρκεια της εγκυμοσύνης.
4. Πρόκληση άμεσου θανάτου.

Η ανάλυση των επί μέρους αυτών κατηγοριών, έχει ως εξής:

1. Είναι κατηγορηματικά βέβαιο πως η ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει καρκίνο στα ζώα και στον άνθρωπο. Ο καρκίνος προκαλείται όταν ένα σωματικό κύτταρο σταματά να υπακούει στις γενετικές εντολές και αρχίζει να διαιρείται και να πολλαπλασιάζεται ασταμάτητα. Η αρχική αλλαγή μάλλον εντοπίζεται στο γενετικό υλικό (γονιδίωμα) του κυττάρου αυτού. Περιπτώσεις πρόκλησης καρκίνου από ακτινοβολία, έχουν αναφερθεί πάρα πολλές μετά από την ανακάλυψη των

ακτίνων -X και των άλλων πηγών ιονίζουσας ακτινοβολίας. Έτσι είναι γνωστό πως οι πρώτοι ακτινολόγοι, που δεν γνώριζαν τις βλαβερές επιδράσεις των ακτίνων -X, έπαιρναν πολύ λίγες ή καθόλου προφυλάξεις (εικ. 73) με αποτέλεσμα οι πιο πολλοί να πεθαίνουν από λευχαιμία (καρκίνος του αίματος που εκδηλώνεται με αύξηση του αριθμού των λευκοκυττάρων στο αίμα), από καρκίνο του δέρματος και από καρκίνο των οστών. Η Marie Curie πέθανε από λευχαιμία, όπως επίσης και η κόρη της Irene που τη βοηθούσε στα πειράματα με ραδιενέργεια. Ακόμη οι εργαζόμενες σε ένα εργοστάσιο κατασκευής ρολογιών, έβαφαν με μπογιά που περιείχε ράδιο, τους δείκτες με τη βοήθεια πινέλλου το οποίο έκαναν μυτερό με τα χείλη τους.



Εικ. 73: Επιπτώσεις των ακτίνων-X στο χέρι ακτινολόγου-οδοντιάτρου που συνηθίζει να κρατά το φωτογραφικό πλακίδιο στο στόμα του ασθενούς κατά την ακτινογράφιση.

Το ραδιενεργό υλικό φυσικά, μετά την είσοδό του στο πεπτικό σύστημα, απορροφάτο από ζωτικά όργανα, με αποτέλεσμα όλες σχεδόν να πεθάνουν είτε από αναιμία είτε από καρκίνο των οστών.

Ένα άλλο τραγικό περιστατικό συνέβη όταν οι εργάτες των ορυχείων ουρανίου στο Κολοράντο ανέπνεαν ραδιενεργή σκόνη, με συνέπεια να εμφανίσουν σε μεγάλο ποσοστό, καρκίνο των πνευμόνων εξ αιτίας εισπνοής ραδίου -226.

Υπάρχουν ακόμα περιπτώσεις που η εμφάνιση καρκίνου μιας μορφής ήταν αποτέλεσμα της καταπολέμησης άλλης ασθένειας με ακτίνες -X. Στην Αγγλία π.χ. στα 1930 - 1940, περίπου 14.000 άνθρωποι υποβλήθηκαν σε ακτινοθεραπεία της σπονδυλικής στήλης.

Οι ακτίνες ήταν πράγματι πολύ θεραπευτικές για το συγκεκριμένο σκοπό, αλλά είχαν και επίδραση (περίπου 70 περιπτώσεις) στην πρόκληση λευχαιμίας, αρκετά χρόνια αργότερα.

Η μεγαλύτερη όμως τραγωδία μαζικής έκθεσης σε ακτινοβολίες ήταν η έκρηξη της πρώτης ατομικής βόμβας στην Ιαπωνία (Χιροσίμα 6 Αυγούστου 1945). Εκεί, πολλοί άνθρωποι πέθαναν αμέσως όχι τόσο από την ακτινοβολία, όσο από άλλες αιτίες (εγκαύματα κ.λπ.), εφ' όσον βρισκότουσαν κοντά στο επίκεντρο. Η Χιροσίμα είχε πληθυσμό 250.000 κατοίκους, 68.000 πέθαναν την πρώτη μέρα

και 19.000 κατά τους επόμενους 4 μήνες. Το Ναγκασάκι είχε πληθυσμό 174.000 κατοίκους από τους οποίους σκοτώθηκαν 38.000 την πρώτη μέρα και 17.000 κατά τους επόμενους 4 μήνες. Από τους ανθρώπους που επέζησαν, αρκετοί πέθαναν από λευχαιμία. Οι περιπτώσεις αυτές εμφανίστηκαν γύρω στα 1950, δηλαδή 5 - 7 χρόνια μετά την ακτινοβολήση με σχέση εξαρτημένη από τη δόση που πήρε ο καθένας κατά την έκρηξη της ατομικής βόμβας. Καθώς όμως περνούν τα χρόνια μετά την έκρηξη και άλλες μορφές καρκίνου εμφανίζονται, όπως των πνευμόνων, του στήθους και ιδιαίτερα του θυροειδούς, με εκτίμηση πως σε σχέση με τη λευχαιμία, αυτοί οι καρκίνοι θα προκαλέσουν 5πλάσια σε αριθμό θύματα, που ο συνολικός αριθμός θα ξεπεράσει τους 1.000.

Το ερώτημα είναι αν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις πληροφορίες αυτές, για να προβλέψουμε την εκδήλωση των καρκίνων αυτών σε περιπτώσεις χρόνιας ακτινοβολήσης με μικρές δόσεις. Υπάρχουν αρκετοί που υποστηρίζουν πως υπάρχει απ' ευθείας σχέση. Δηλαδή αν σε 10.000 ανθρώπους εμφανίζονται 400 περιπτώσεις καρκίνου με ακτινοβολήση 100 rad τότε με ακτινοβολήση 1 rad θα δημιουργηθεί ο ίδιος αριθμός καρκίνων από πληθυσμό 1.000.0000 ανθρώπων. Πάντως μεγάλος αριθμός επιστημόνων πιστεύει πως δεν είναι πραγματική μια τέτοια αναλογία, αφού όσο ελαττώνεται η δόση, τόσο ελαττώνεται, με ακόμα γοργότερο ρυθμό, η καταστρεπτική της δράση. Οπωσδήποτε όμως, όλοι συμφωνούν πως δεν υπάρχει δόση κάτω από την οποία δεν συμβαίνουν αλλοιώσεις στα βιολογικά συστήματα.

2. Όπως είδαμε παραπάνω, όταν ένα σωματικό κύτταρο υποστεί τις επιδράσεις της ακτινοβολίας, τότε εμφανίζεται (μετά από κάμποσα χρόνια) μια κάποια μορφή καρκίνου. Αν όμως τα κτυπημένα από την ακτινοβολία κύτταρα τυχαίνει να είναι γεννητικά, δηλαδή προερχόμενα από τις γονάδες (όρχεις ή ωοθήκες) του αρσενικού ή θηλυκού ατόμου, τότε το αποτέλεσμα θα βαρύνει κυρίως την επόμενη (ή τις επόμενες) γενιές. Με άλλα λόγια στην περίπτωση αυτή συζητάμε τις επιπτώσεις που μπορεί να έχει μια ακτινοβολία όταν επιδράσει στα κληρονομικά μακρομόρια (DNA) των χρωματοσωμάτων (γονίδια). Τέτοιες γενετικές μεταλλαγές είναι πολύ συνηθισμένες και υπεύθυνες για πολλές φυσικές ανωμαλίες ατόμων καθώς και για ασθένειες. Υπολογίζεται πως 6% του παγκόσμιου πληθυσμού υποφέρει από κληρονομήσιμες (γενετικές) ασθένειες, συμπεριλαμβανομένων των διανοητικών ασθενειών. Υπάρχουν βέβαια και περιπτώσεις όπου η γενετική ανωμαλία επιφέρει το θάνατο του εμβρύου πριν την γέννηση. Πέρα από τις μεταλλαγές που συμβαίνουν αυθόρμητα για διάφορους λόγους (τυχαία λάθη κατά την αντιγραφή του DNA, φυσικές πηγές ακτινοβολίας κ.α.), έχει γίνει προσπάθεια να κατανοηθούν και εκείνες που προκαλούνται όταν ένα άτομο (ή ένας πληθυσμός) υποστεί την επίδραση ακτινοβολιών. Με πειράματα που έγιναν σε μεγάλο αριθμό ποντικών (χρειάζεται μεγάλος αριθμός πειραματόζων για τέτοια γενετικά πειράματα), οι επιστήμονες κατέληξαν στα συμπεράσματα πως α) διαφορετικές μεταλλαγές διαφέρουν ως προς την ευαισθησία στην ακτινοβολία, β) η επίδραση μιας δεδομένης δόσης είναι μεγαλύτερη όταν εκτεθεί το αρσενικό άτομο στη δόση αυτή, γ) τα αποτελέσματα ελαττώνονται όσο μεγαλώνει ο χρόνος ανάμεσα στην ακτινοβολία και στη σύλληψη δ) αν μια δόση δοθεί με αργό ρυθμό, τότε η

βλαβερή επίδραση μειώνεται σημαντικά ε) για να διπλασιαστεί ο αριθμός των μεταλλαγών που δημιουργούνται αυθόρμητα, χρειάζεται μια δόση 10 - 200 rads.

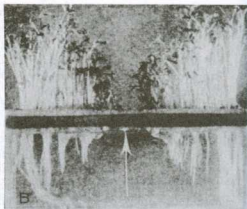
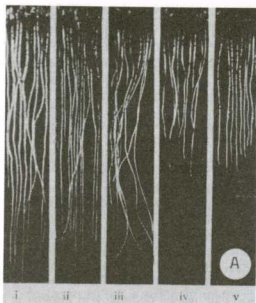
Σε επίπεδο ανθρώπινου οργανισμού τα δεδομένα που υπάρχουν, προέρχονται από την περιοχή της Hiroshima. Σύμφωνα με αυτά, δεν έχει διαπιστωθεί αύξηση του αριθμού των μεταλλαγών. Κατά τους ειδικούς όμως, αυτό οφείλεται σε δύο λόγους. Πρώτα, ο αριθμός των ατόμων που επέζησαν είναι μικρός για να εξαχθούν γενετικά συμπεράσματα. Έπειτα ο καιρός που έχει περάσει (λίγο περισσότερο από μια γενιά) είναι μικρός για να επιτρέψει την εκδήλωση υπολειπόμενων μεταλλαγών που συνήθως απαιτούν πολλές γενιές. Η έλλειψη πάντως εμφάνισης συγκεκριμένων γενετικών αλλαγών σε ανθρώπους, δεν σημαίνει αναγκαστικά πως οι ιονίζουσες ακτινοβολίες είναι ακίνδυνες για αυτούς.

Μάλλον θα πρέπει να βασιστούμε στα πειράματα που έχουν γίνει σε πειραματόζωα (κυρίως σε ποντικούς μια που τα έντομα είναι πολύ περισσότερο ανθεκτικά από τον άνθρωπο απέναντι στην ακτινοβολία). Με τη βάση αυτή πιστεύεται πως η δόση που διπλασιάζει τον αριθμό των γενετικών μεταλλαγών είναι 30 rad. Αν σκεφτούμε πως μια μέση δόση από ακτινογραφίες X είναι της τάξης των 36 m rad/χρόνο, είναι φανερό πως οι κίνδυνοι από αυτή τουλάχιστον την ακτινοβόληση είναι πολύ μικροί.

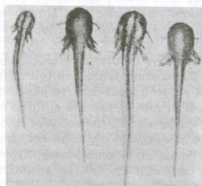
Ακόμα και όσοι εργάζονται σε περιοχές με υψηλή ραδιενέργεια (πυρηνικοί αντιδραστήρες, ακτινολογικά εργαστήρια), παίρνουν ίσως λίγη περισσότερη δόση ακτινοβολίας από τους υπόλοιπους ανθρώπους, αλλά επειδή κατανέμεται σε χαμηλούς ρυθμούς θεωρείται ακίνδυνη. Πειράματα που έχουν γίνει έδειξαν την επίδραση της ακτινοβολίας στην ανάπτυξη φυτικών και ζωικών οργανισμών (εικ. 74 και 75).

3. Για λίγες μέρες μετά τη γονιμοποίηση, ένα αυγό υφίσταται έντονες διαιρέσεις. Μετά από 9 περίπου μέρες τα κύτταρα βρίσκονται προσδεμένα στα τοιχώματα της μήτρας από όπου διαφοροποιούνται για να σχηματίσουν τα μάτια, τον εγκέφαλο, τα χέρια και τα πόδια. Ακριβώς κατά τη χρονική περίοδο αυτή, το έμβρυο είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο σε φάρμακα, αρρώστιες και ακτινοβολίες. Δεδομένα για τον άνθρωπο υπάρχουν και πάλι από την περιοχή της Hiroshima, όπου λίγους μήνες μετά την έκρηξη γεννήθηκαν παιδιά με διάφορες ανωμαλίες. Οι πληροφορίες όμως αυτές δεν μας λύνουν το πρόβλημα εάν δηλ. και κατά πόσο μικρές δόσεις (όπως π.χ. αυτές που προέρχονται από ακτινογραφίες) μπορούν να επηρεάσουν τη διάπλαση του εμβρύου. Το γεγονός μάλιστα πως ένα στα 20 παιδιά που γεννιούνται έχει κάποια μορφή γενετικής ανωμαλίας, μας εμποδίζει να διαπιστώσουμε με σιγουριά οποιαδήποτε σχέση ανάμεσα σε δόση ακτινοβολίας και πρόκληση συγκεκριμένης γενετικής ανωμαλίας. Άλλωστε οι ακτινοβολίες δεν προκαλούν ειδικές μορφές γενετικών μεταβολών, αλλά «απλώς» αυξάνουν την πιθανότητα για πρόκλησή τους.

Υπάρχουν βέβαια περιπτώσεις που λόγο άμεσης ανάγκης επιβάλλουν την ακτινοθεραπεία εγκύων γυναικών. Τότε, πρέπει να γίνεται προσεκτική μέτρηση της δόσης που θα δεχτεί το έμβρυο και να αποφασίζεται αν θα γίνει διακοπή κύησης κατά τις έξι πρώτες βδομάδες ή όχι. Γενικά πιστεύεται πως μια δόση



Εικ. 74: Α: Επιπτώσεις των ακτίνων-Χ στην ανάπτυξη ριζών I) μάρτυρας, II) μάρτυρας χωρίς οξυγόνο, III) 150 R χωρίς οξυγόνο, IV) 150 R με 6 κ.ε. οξυγόνου, V) 375 R χωρίς οξυγόνο. Β: Σταδιακή μείωση της αύξησης ριζών μετά από τοποθέτηση ραδίου-222 στο κέντρο (βέλος).



Εικ. 75: Ατροφική ανάπτυξη εμβρύων βατράχου μετά από ακτινοβόληση σπερματοζωαρίου με σωματίδια-β και φωτόνια-γ (επάνω). Αριστερά μάρτυρες.

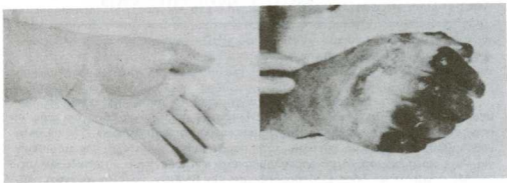
10g μάλλον είναι καταστρεπτική για το έμβρυο και τότε επιβάλλεται η διακοπή της κύησης.

4. Μεγάλες δόσεις ακτινοβολίας επιφέρουν άμεσο θάνατο, γιατί επηρεάζεται το κεντρικό νευρικό σύστημα, ο εγκέφαλος καθώς και οι ιστοί που παράγουν νέα κύτταρα (π.χ. αιμοποιητικός ιστός).

Όλοι οι ζωντανοί οργανισμοί σκοτώνονται όταν εκτεθούν σε πολύ μεγάλες δόσεις ακτινοβολίας. Τέτοιες δόσεις έχουν πραγματοποιηθεί είτε πειραματικά με συσκευές ακτινοβόλησης είτε μετά την έκκριση της ατομικής βόμβας. Η εκτίμηση των θανατηφόρων δόσεων για κάθε οργανισμό γίνεται με τα ακόλουθα κρι-

τήρια: α) Στο τέλος της έκθεσης όλα τα κύτταρα ή οι οργανισμοί, είναι σκοτωμένοι (άμεσος θάνατος). β) όλα τα κύτταρα ή οι οργανισμοί σκοτώνονται λίγες μέρες μετά το τέλος της έκθεσης (αργός θάνατος), γ) ποσοστό 50% των κυττάρων ή των οργανισμών σκοτώνονται συνολικά ενώ το υπόλοιπο 50% συνέρχεται και επιζεί· η δόση αυτή εκφράζεται σαν LD 50 (Lethal Dose 50%), και το χρονικό όριο μέχρι του οποίου γίνονται παρατηρήσεις για θνησιμότητα είναι οι 30 μέρες (σύμφωνα με την παθολογία των ακτινοβολιών χρησιμοποιείται σαν περίοδος παρατήρησης το διάστημα των 30 ημερών).

Επιπτώσεις στον άνθρωπο: Με 400 rem ολόσωμη δόση το 50% των ατόμων πεθαίνουν μέσα σε 30 μέρες γι' αυτό και η δόση αυτή λέγεται LD50 30 ημερών. Το υπόλοιπο 50% επιζεί αλλά παρουσιάζει απώλεια όρεξης, ναυτία και διάρροια κατά την 1η εβδομάδα. Τα συμπτώματα υποχωρούν στη συνέχεια αλλά παρουσιάζεται υψηλός πυρετός και απώλεια βάρους λόγω βλάβης του γαστρεντερικού συστήματος που δεν απορροφά θρεπτικά υλικά. Ένα άλλο σύμπτωμα είναι ο λήθαργος και η ελάττωση των λευκών αιμοσφαιρίων μειώνοντας έτσι την αντίσταση του οργανισμού ενάντια σε αρρώστιες. Χαρακτηριστική και ταυτόχρονα τραγική είναι η περίπτωση δύο πυρηνικών φυσικών στα εργαστήρια του Los Alamos (Η.Π.Α.), οι οποίοι δέχθηκαν από ατύχημα, ολόσωμη δόση 600 R και παρά την άμεση Ιατρική βοήθεια (μεταγγίσεις, μεταμόσχευση μυελού των οστών, χορήγηση ηλεκτρολυτών, κ.α.) πέθαναν και οι δύο (την 9η και 24η μέρα αντίστοιχα) παρουσιάζοντας όλα τα συμπτώματα οξείας ακτινοπάθειας: πυρετό, ναυτία, διάρροια, απώλεια βάρους, αιμοραγία, ίκτερο, καρδιακή ανεπάρκεια και έντονα δερμικά φαινόμενα (εικ. 76).

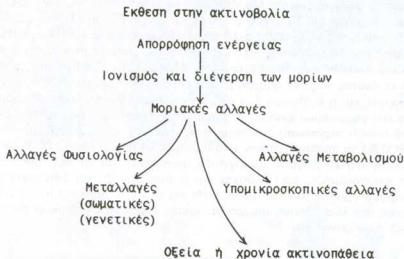


Εικ. 76: Έντονα επιδερμικά φαινόμενα μετά από ακτινοβόληση με 2.000 r. (Από πυρηνικό ατύχημα στο κέντρο Πυρηνικών Ερευνών Los Alamos).

Με 150 rem ολόσωμη δόση σε διάστημα μιας εβδομάδας ο άνθρωπος επιζεί 100%, αλλά μεγάλο ποσοστό παρουσιάζει συμπτώματα *ραδιονόσησης* (radiation sickness) (βλ. κεφ. 4.9.).

Καταλήγοντας, θα πρέπει να επισημάνουμε ότι το φαινόμενο της επίδρασης ιονιζουσών ακτινοβολιών στους ζώντες οργανισμούς είναι πολύπλοκο αλλά μπορεί να αποδοθεί σχηματικά ως εξής (Πίνακας XIX).

ΠΙΝΑΚΑΣ XIX. Σχηματική απόδοση της επίδρασης των ιονιζουσών ακτινοβολιών στους ζώντες οργανισμούς.



4.6. Επανορθωτικές διεργασίες.

Τα φαινόμενα επανόρθωσης εξαρτώνται από το ποσό της ενέργειας που απορροφήθηκε. Έτσι, μετά από ακτινοβόληση με πολύ μικρή δόση δια μιας, οι περισσότεροι ιστοί συνέρχονται και συμπεριφέρονται φυσιολογικά. Π.χ. αν ακτινοβοληθούν διαιρούμενα κύτταρα, τότε παρατηρείται αναστολή των μιτώσεων για λίγες ώρες ενώ αργότερα επαναλαμβάνεται φυσιολογικά ο μιτωτικός κύκλος.

Με μεγαλύτερες δόσεις, η επανόρθωση των βλαβών είναι φαινομενικά πλήρης, αλλά στην πραγματικότητα μπορεί να έχει αλλάξει μια ιδιότητα του ιστού που να μην επηρεάζει τη λειτουργία του. Π.χ. αν ακτινοβολήσουμε το δέρμα πειραματόζωου, τότε προκαλείται πτώση των τριχών. Η επανόρθωση συνίσταται στο φύτρωμα νέων τριχών που μπορεί όμως να έχουν άλλο χρώμα (αντί να είναι μαύρες, βγαίνουν άσπρες). Ανάλογο αποτέλεσμα έχει παρατηρηθεί στον άνθρωπο (ανάπτυξη μαύρων τριχών αντί άσπρων, μετά από υπερβολική έκθεση κατά την ακτινογράφιση).

Με ακόμα μεγαλύτερες δόσεις η επανόρθωση μπορεί να γίνει με την ίδια

επιτυχία εκτός αν ο ιστός υποβληθεί ξανά σε stress (ακτινοβολήση, κρύο, ζέστη, κ.λ.π.) οπότε εμφανίζει ανεπανόρθωτες βλάβες.

Οι επανορθωτικές διεργασίες χαρακτηρίζονται σαν *πρωτογενείς*, όταν όλα τα προσβληθέντα συστατικά επανέρχονται στην προηγούμενη φυσιολογική τους κατάσταση (μορφολογική και λειτουργική), και σαν *δευτερογενείς*, όταν τα ακτινοβλημένα κύτταρα εκφυλίζονται και αντικαθίστανται από πολλαπλασιασμό γειτονικών κυττάρων. Ο δεύτερος αυτός τρόπος είναι ο πιο συνηθισμένος. Θεωρητικά προτείνονται δύο μηχανισμοί με τους οποίους είναι δυνατό να γίνει επανόρθωση κυτταρικής βλάβης μετά από ακτινοβολήση: α) με εξουδετέρωση των δευτερογενών αποτελεσμάτων στη μοριακή κλίμακα και β) με δημιουργία νέων βιοχημικών αντιδράσεων που παρεμποδίζουν τη συσσώρευση άτυπων μορίων.

4.7. Παράγοντες που τροποποιούν την αντίδραση των οργανισμών απέναντι στην ιονίζουσα ακτινοβολία.

Οι παράγοντες αυτοί πιθανό να μην έχουν επίδραση στις πρωτογενείς φυσικές αντιδράσεις, αλλά επηρεάζουν τα γεγονότα του φυσικοχημικού και βιοχημικού σταδίου. Επειδή οι πιο πολλές αντιδράσεις των σταδίων αυτών γίνονται με τη συμμετοχή του νερού, γι' αυτό η περιεκτικότητα των κυττάρων σε νερό παίζει καθοριστικό ρόλο στην έκταση των βλαβών. Έτσι, έχει παρατηρηθεί πως οργανισμοί που βρίσκονται σε νερό είναι πιο ευαίσθητοι από άλλους που ζουν σε ξηρό περιβάλλον. Ακόμα, η συμμετοχή του μοριακού *οξυγόνου* στην εκδήλωση των βλαβερών επιδράσεων της ακτινοβολίας είναι γενικά παραδεκτή από τους ραδιοβιολόγους (εικ. 69). Με σειρά πειραμάτων έχει μελετηθεί το ποσό της συγκέντρωσης οξυγόνου που απαιτείται για να μεγιστοποιηθεί η ευαισθησία διαφόρων βιολογικών συστημάτων. Όταν αφαιρεθεί το οξυγόνο (με πρόσθεση αζώτου) τότε τα βλαβερά επακόλουθα ελαττώνονται σημαντικά. Αντίθετα η παρουσία οξυγόνου κατά τη διάρκεια της ακτινοβολήσης οδηγεί σε μεγάλη αύξηση των βλαβερών αποτελεσμάτων. Η πρόσθεση οξυγόνου μετά την ακτινοβολήση δεν επηρεάζει τη δράση της ακτινοβολίας.

Διάφοροι χημικοί παράγοντες ελαττώνουν την αποτελεσματικότητα των ιονίζουσών ακτινοβολιών κατά μονάδα δόσης. Πιθανώς δεν υπάρχει ενιαίος μηχανισμός για τη χημική προστασία. Έτσι ο μηχανισμός προστασίας των θηλαστικών είναι διαφορετικός από εκείνον που ισχύει για τα ζωντανά ελεύθερα κύτταρα. Π.χ. το κυανιούχο νάτριο ή κάλιο χορηγούμενο σε ποντικούς και σε μη τοξικές δόσεις (0,005mg/gr. βάρους ζώου) πριν από την ακτινοβολήση, προστατεύει το 50 - 80% των ζώων από την ελάχιστη δόση, που σκοτώνει όλα τα απροστάτευτα ζώα. Ανάλογη προστατευτική δράση διαπιστώθηκε σε ορισμένες ενώσεις, που περιέχουν τη ρίζα SH, όπως το γλουταθείο, η κυστεΐνη, η κυσταμίνη και η κυστεαμίνη. Οι σουλφυδρικές αυτές ενώσεις είναι οι σημαντικότερες και πιο χρήσιμες προστατευτικές ουσίες, που διαθέτουμε μέχρι σήμερα. Οι παρατηρήσεις σχετικά με τις ενώσεις αυτές συμφωνούν με την υπόθεση ότι είναι ικανές

να εξουδετερώσουν όλα τα οξειδωτικά παράγωγα του ακτινοβοληθέντος ενδοκυτταρικού νερού. Μιά άλλη ομάδα ουσιών με προστατευτική δράση είναι οι μερκαπτοαλκυλαμίνες (αμινοαλκυλισοθειουρίες, αμινοβουτυλισοθειουρίες κ.ά.). Πρέπει να τονιστεί ότι αν και ορισμένες χημικές ουσίες μπορούν να προστατεύσουν ένα ιστό από την οξεία θνησιμότητα (30 ημέρες) και αυξάνουν σημαντικά τη διάρκεια ζωής των ζώων μετά την ακτινοβόληση σε περίπου 60 - 70% του κανονικού χρόνου, εν τούτοις δεν προστατεύουν εξ ίσου όλα τα συστήματα του ζώου και μερικά μάλιστα συστήματα καθόλου. Αυτό είναι εύλογη συνέπεια των χημικών ιδιοτήτων των ενώσεων, καθώς επίσης και των φυσιολογικών διαφορών των διαφόρων ιστών, οι οποίες παρεμποδίζουν την ομοιόμορφη κατανομή της ένωσης στο ζώο. Π.χ. υπάρχει σοβαρή ένδειξη ότι οι σουλφυδρικές ενώσεις προστατεύουν το αιμοποιητικό σύστημα και από την απώλεια βάρους, αλλά δεν προστατεύουν από γενετικές βλάβες και βλάβες του τριχώματος.

4.8. Συνθήκες που τροποποιούν τη ραδιοευαισθησία των ιστών:

Ο μεγαλύτερος αριθμός και η ποικιλία των βλαβών από ακτινοβολίες δεν οφείλονται μόνο σε διαφορές της ολικής δόσης και του ρυθμού παροχής αυτής, αλλ' επίσης και στην κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο ιστός κατά τη στιγμή της ακτινοβόλησης, όπως και στο είδος του ιστού. Όπως ειπώθηκε, σημαντικός παράγοντας στην πρόκληση των βλαβών είναι εκτός από το είδος της ακτινοβολίας και ο ρυθμός παροχής αυτής. Π.χ. δόση 900 r που χορηγείται μέσα σε λίγα λεπτά θα προκαλέσει δευτεροβάθμιο έγκαυμα του εκτεθέντος δέρματος. Αν η ίδια δόση χορηγηθεί σε περίοδο μηνός με σειρά 9 δόσεων από 100 rn κάθε μια, τότε δεν θα προκληθεί τέτοιο έγκαυμα. Αυτό σχετίζεται με το γεγονός ότι αντίθετα με τις γενετικές βλάβες, οι οποίες δεν είναι αναστρεπτές, οι βλάβες των σωματικών ιστών μπορούν να επανορθωθούν με *αναστρεπτή φυσιολογική διεργασία*, που επιτρέπει την επανόρθωση μεταξύ των δόσεων. Για ένα δεδομένο ιστό (με εξαίρεση των αναπαραγωγικών κυττάρων) υπάρχει μια ελάχιστη δόση, που όταν ξεπεραστεί προκαλεί ορατές βιολογικές βλάβες. Όταν μικρή έκταση ενός οργανισμού υποβληθεί στην ακτινοβολία, τότε γίνεται ανεκτή πολύ μεγαλύτερη δόση παρά όταν ακτινοβληθεί μεγάλη περιοχή του οργανισμού αυτού. Επί ολοσώμου εκθέσεως το θανατηφόρο αποτέλεσμα επιτυγχάνεται με δόση η οποία είναι πολλοσθημόριο της δόσης, που είναι ανεκτή από μεμονωμένα όργανα ή ιστούς.

Η κατάσταση του ιστού κατά τη στιγμή της ακτινοβόλησης είναι άλλος σημαντικός παράγοντας στη δημιουργία των βλαβών από ακτινοβολίες. Έτσι σχετικά χαμηλές δόσεις δυνάτον να οδηγήσουν υπό ορισμένες συνθήκες στο θάνατο των κυττάρων, ενώ υπό διαφορετικές συνθήκες η ίδια δόση δεν είναι ικανή να προκαλέσει κάποια μόνιμη βλάβη του ιστού. Γενικά η ευαισθησία ενός και του αυτού κυττάρου στην ακτινοβολία εξαρτάται από το βαθμό της ενυδάτωσής του

και από την μεταβολική και την αναπαραγωγική του κατάσταση κατά τη στιγμή της ακτινοβόλησης. Έτσι τα κύτταρα είναι περισσότερο τρατώ από την ακτινοβολία κατά τις περιόδους έντονης εκκριτικής δραστηριότητας ή μιτωτικής διαίρεσης. Για τους ίδιους λόγους, ενώ σε μία περίπτωση η ακτινοβόληση προκαλεί φλεγμονή ενός ηρεμούντος ιστού, σε άλλη περίπτωση η ίδια ακτινοβόληση συμβάλλει στο μετριασμό υπάρχουσας φλεγμονής. Αυτό σημαίνει ότι η ακτινοβόληση δρα στη μία περίπτωση σαν βλαβερός παράγοντας, ενώ στην άλλη σαν παράγοντας που υποβοηθά στην επανόρθωση του ιστού. Αυτό εξηγεί το παράξενο γεγονός ότι η ακτινοβολία επιδρά τόσο σαν καρκινογόνος παράγοντας, όσο και σε μέσο θεραπείας του καρκίνου. Η ραδιοευαισθησία των κυττάρων ελαττώνεται μελώνοντας η ηλικία και είναι αντίστροφα ανάλογη του βαθμού της φυσιολογικής και μορφολογικής διαφοροποίησής τους.

4.9. Οξεία και χρόνια ακτινοπάθεια

Η έκθεση ενός οργανισμού σε σχετικά μεγάλες δόσεις ιονιζουσών ακτινοβολιών που δίνονται σε σύντομο χρόνο προκαλεί ποικιλία νοσηρών συμπτωμάτων και αλλοιώσεων που στο σύνολό τους χαρακτηρίζουν το φαινόμενο της *οξείας ακτινοπάθειας*. Από την άλλη μεριά, εκθέσεις σε ακτινοβολίες χαμηλής έντασης που δίνονται σε παρατεταμένο χρόνο προκαλούν διαταραχές που αποτελούν το φαινόμενο της *χρονίας ακτινοπάθειας*. Είναι φανερό πως τα όρια μεταξύ των δύο αυτών φαινομένων δεν είναι ξεκάθαρα και εξαρτώνται από την ένταση και το είδος της ακτινοβολίας, καθώς και από το μέγεθος της περιοχής που ακτινοβολήθηκε.

Γενικά, τα συμπτώματα και οι μεταβολές που παρατηρούνται αμέσως μετά ή πολύ αργότερα από την έκθεση στην ακτινοβολία είναι τα εξής:

Ραδιονόσηση: κατάσταση κακουχίας που επικαλύπτει ή συνυπάρχει με άλλες νοσηρές εκδηλώσεις όπως πονοκέφαλος, ζαλάδες, αδυναμία, ανωμαλία στις οσφρητικές και γευστικές αισθήσεις, ανορεξία, ναυτία, έμετος, διάρροια, ταχυπαλμία, πτώση πίεσης αίματος, δύσπνοια, λευκοπενία, αιμινία κ.λπ.

Τοπική και γενική τοξιναιμία προερχόμενη από προϊόντα αποσύνθεσης.

Ελάττωση αποδοτικότητας, φυσικής και διανοητικής.

Μεταπλασίες που οδηγούν σε τερατώματα, καρκινώματα και σαρκώματα.

Επιταχυμένη γήρανση των οργάνων των οργανισμών.

Ελάττωση της ζωτικότητας και του σφρίγγου των ατόμων ενός πληθυσμού.

4.9.1. Φαινόμενο οξείας ακτινοπάθειας.

Το φαινόμενο αυτό, όπως αναφέρθηκε, παρατηρείται συνήθως μετά από ολόσωμες εκθέσεις των οργανισμών σε μεγάλες δόσεις ακτινοβολίας (βλέπε επίσης κεφ. 5).

Εκτός από τις πειραματικές ακτινοβολήσεις πειραματόζωων, πληροφορίες για τις επιπτώσεις της ακτινοβολίας στον άνθρωπο έχουν συλλεγεί α) από τις πολλές χιλιάδες θυμάτων των ατομικών εκρήξεων στη Hiroshima και στο Nagasaki της Ιαπωνίας στα 1945 (εικ. 77) β) από ακτινοβόληση 400 περίπου ατόμων στον Ειρηνικό Ωκεανό μετά από ατύχημα σε θερμοπυρηνική έκρηξη, γ) από ατυχήματα



Εικ. 77: Έντονα επιδερμικά φαινόμενα κατά την ατομική έκρηξη στη Χιροσίμα. Διακρίνεται το αποτύπωμα των ρούχων επάνω στο δέρμα. Σημαντικότερες όμως είναι οι αόρατες βλάβες που επιδρούν σε βάθος δηλ. σε σωματικά και σε γεννητικά κύτταρα.

σε πυρηνικά κέντρα, νοσοκομεία, βιομηχανίες και δ) από ακτινοβολήσεις ατόμων στα πλαίσια θεραπειών καρκίνου. Έτσι όλες αυτές οι πληροφορίες συνοψίζονται ως εξής:

0 - 100r: Είναι πιθανό να μην υπάρχουν συμπτώματα, αν και μικροσκοπική εξέταση αποκαλύπτει βλάβες του περιφερειακού αίματος.

100 - 200r: Ελαφρά ραδιονόσηση με απουσία θανάτων.

200 - 400r: Βαρειά ραδιονόσηση με θανάτους σε λιγώτερα από τα μισά άτομα (δόση μικρότερη της LD_{50}).

400 - 800r: Βαρειά ραδιονόσηση με θανάτωση σε περισσότερα από τα μισά άτομα. Στη δόση των 800r παρατηρείται θάνατος σε όλα τα εκτεθέντα άτομα.

1000r: Καταστροφή των προγεννητικών ιστών με θανάτους σε όλα τα εκτεθέντα άτομα μέσα σε 30 - 60 μέρες.

1.000r - 3.000r: Καταστροφή γαστροεντερικού βλενογόνου· πρόκληση θανάτου σε δύο εβδομάδες.

10.000r: Ανακοπή λειτουργίας κεντρικού νευρικού συστήματος με θανάτους μέσα σε λίγα λεπτά.

100.000 r: Σπασμοί με θανάτους μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα.

4.9.2. Φαινόμενο χρόνιας ακτινοπάθειας.

Αποτελέσματα χρόνιας ακτινοπάθειας έχουν διαπιστωθεί σε άτομα που χειρίζονται ραδιενεργές ουσίες σε μεταλλωρύχους ραδιενεργών ορυκτών, σε επιστήμονες που δουλεύουν με ραδιενεργά ισότοπα, σε άτομα που χειρίζονται συσκευές ακτίνων Χ (ακτινολόγοι κ.λπ.), επιταχυντές, αντιδραστήρες και τέλος σε αρρώστους που υποβάλλονται σε θεραπευτική ακτινοβολήση.

Τα γενικά συμπτώματα της χρόνιας ακτινοπάθειας είναι ανορεξία, ναυτία, έμετοι, διάρροια, πονοκέφαλοι, ίλιγγοι, αυπνίες, αδυναμία, υπόταση, καρδιακή αρυθμία κ.ά. Εκτός από τα γενικά αυτά συμπτώματα η χρόνια ακτινοπάθεια μπορεί να εκδηλωθεί και με τοπικά φαινόμενα όπως καρκίνο του δέρματος, λευχαιμία, καταρράκτη, στείρωση. Εκτός όμως από τις σωματικές αυτές βλάβες η χρόνια έκθεση του ανθρώπου σε ακτινοβολία προκαλεί και αύξηση της συχνότητας των γονιδιακών μεταλλαγών ακόμα και με μικρές δόσεις π.χ. 20 γ λαμβανόμενα δια μιας ή τμηματικά εμφανίζουν τον ίδιο κίνδυνο σε επίπεδο γονιδίων αφού η δράση είναι αθροιστική δηλ. δεν γίνονται επανορθωτικές αντιδράσεις. Τα τελικά αποτελέσματα μιας τέτοιας ακτινοβολήσης εμφανίζονται, όπως ξέρουμε, στις επόμενες γενιές. Αν στο γεγονός αυτό προσθέσουμε τη διαπίστωση πως οι πιο πολλές μεταλλαγές έχουν καταστρεπτικά αποτελέσματα στο ανθρώπινο είδος και ακόμα πως ο σημερινός πολιτισμός τείνει να καταργήσει την φυσική επιλογή με την οποία η φύση εξουδετερώνει τα προϊόντα δυσμενών μεταλλαγών, τότε καταλήγουμε στο ακόλουθο συμπέρασμα: Δηλ. πως οι κίνδυνοι από τις ιονίζουσες ακτινοβολίες δεν περιορίζονται μόνο στις βλάβες που προξενούν σε συγκεκριμένα άτομα αλλά, με τη βοήθεια του γενετικού δρόμου, απειλούν ολόκληρη την ανθρωπότητα με εκφύλιση και αφανισμό, ακριβώς λόγω της αύξησης του ρυθμού των δυσμενών μεταλλαγών.

4.10. Ραδιοευαισθησία διαφόρων ομάδων οργανισμών, φυτικών και ζωικών.

Η ραδιοευαισθησία είναι διαφορετική όχι μόνο μεταξύ των διαφόρων κυττάρων, ιστών και οργάνων ενός δεδομένου οργανισμού αλλά και μεταξύ διαφόρων ομάδων οργανισμών (Πίνακας XX).

Έτσι, οι μονοκύτταροι ζωικοί οργανισμοί είναι κατά κανόνα περισσότερο ανθεκτικοί στην ακτινοβολία, με LD_{50} 100.000 - 300.000 γ. Για τα Ασπόνδυλα ή LD_{50} κυμαίνεται από 2.000 - 80.000 γ' ανθεκτικότερα είναι τα έντομα. Μεταξύ των Σπονδυλοζώων, τα θηλαστικά είναι τα πιο ευαίσθητα.

Στο φυτικό βασίλειο, η ραδιοαντοχή είναι επίσης μεγαλύτερη στα μονοκύτταρα, π.χ. για τη μαγιά η LD_{50} είναι 30.000 γ. Στους προκαρυωτικούς οργανισμούς επίσης έχουμε μεγάλες τιμές LD_{50} . Π.χ. στο κολοβακτηρίδιο *E. coli* ή LD_{50} είναι 5600 γ ενώ στο μεσεντερικό βάκιλλο η LD_{50} είναι 150.000 γ. Ακόμα, η τιμή LD_{50} ελαττώνεται όσο αυξάνει η ηλικία του οργανισμού ενώ σε δεδομένη φυλή τα θηλυκά άτομα είναι περισσότερο ραδιοευαίσθητα από τα αρσενικά.

ΠΙΝΑΚΑΣ XX: Ραδιοευαισθησία διαφόρων οργανισμών

Οργανισμός	Μέση θανατηφόρα δόση (LD ₅₀)
Πρωτόζωα (Βλεβαριδοφόρα)	300.000 r
Πρωτόζωα (Αμοιβάδες)	100.000 r
Έντομα	80.000 r
Χελώνα	1.500 r
Κόττα	1.000 r
Ποντικός	900 r
Βάτραχος	700 r
Χρυσόψαρο	670 r
Πίθηκος	500 r
Άνθρωπος	450 r
Σκύλος	400 r
Κατσίκι	350 r
Γουρούνι	275 r

4.11. Επιπτώσεις μέσω της τροφικής αλυσίδας

Εκτός από τις περιπτώσεις με εξωτερική έκθεση στην ακτινοβολία, πολύ σημαντικές μπορούν να είναι οι βλάβες από την εναπόθεση ραδιενεργών στοιχείων ή ισωτόπων σε διάφορα μέρη του σώματος κατά την πρόσληψη ραδιομολυσμένης τροφής ή εισπνοής ραδιομολυσμένου αέρα.

Ιώδιο - 131: Συγκεντρώνεται στο θυρεοειδή αδένι όπου μπορεί να προκαλέσει καρκίνο αρκετά χρόνια αργότερα. Έχει χρόνο υποδιπλασιασμού ραδιενέργειας 8 μέρες και το μεγαλύτερο ποσοστό ραδιενέργειας αποβάλλεται από τον οργανισμό μέσα σε 2 μήνες. Μέσω της τροφής (χόρτα) απορροφάται από τα γαλακτοπαραγωγά ζώα και αποθηκεύεται αμέσως στο γάλα τους που αποτελεί και την κύρια πηγή μόλυνσης του ανθρώπου (ιδιαίτερα των παιδιών που καταναλώνουν πολύ φρέσκο γάλα).

Βάριο - 140: Συγκεντρώνεται στα οστά (επειδή μοιάζει το μόριό του με εκείνο του ασβεστίου) όπου μπορεί να προκαλέσει καρκίνο 20 - 30 χρόνια αργότερα. Έχει χρόνο υποδιπλασιασμού ραδιενέργειας 12,8 μέρες.

Κρυπτόν - 85: Επηρεάζει όλους τους ιστούς του σώματος και μπορεί να ενεργοποιήσει την καρκινογένεση (π.χ. εμφάνιση λευχαιμίας 2 - 3 χρόνια αργότερα). Έχει χρόνο υποδιπλασιασμού ραδιενέργειας 10,7 χρόνια.

Καίσιο - 137: Επηρεάζει τα μαλακά μόρια (κυρίως μυς, σκυτί, σπλήνα) και έχει χρόνο υποδιπλασιασμού ραδιενέργειας 30,2 χρόνια, αλλά έχει μόλις 100 μέρες βιολογικό κύκλο υποδιπλασιασμού (δηλ. ποσότητας μέσα στον ιστό) και αντίθετα με το ιώδιο, ισοκατανέμεται στους διάφορους ιστούς.

Στρόντιο - 90: Συγκεντρώνεται στα οστά όπου ο ρυθμός ανανέωσης είναι πολύ αργός. Π.χ. είναι 50% / χρόνο για βρέφη και παιδιά, ενώ πέφτει στο 1% / χρόνο για τους ενήλικες. Έτσι η συκέντρωσή του στα οστά μπορεί να προκαλέσει σοβαρές παθήσεις αφού ο χρόνος υποδιπλασιασμού της ραδιενέργειας του είναι 28 χρόνια.

Γενικά επίδραση της ιονίζουσας ακτινοβολίας στον άνθρωπο προκαλεί (σε υψηλές δόσεις):

- Εγκαύματα στο δέρμα
- Πτώση των τριχών
- Καταστροφή των νυχιών
- Καταστροφή του μυελού των οστών
- Μείωση παραγωγής ερυθρών και λευκών αιμοσφαιρίων (Η σειρά ευαισθησίας είναι: λευκοκύτταρα, πολυμορφοπύρρηνα, ερυθροκύτταρα).
- Ανωμαλία καρδιακής λειτουργίας ακόμη και αρκετά χρόνια μετά την έκθεση.
- Καταστροφή αγγείων με επακόλουθο αιμοραγίες και θρομβώσεις.
- Αναστολή σπερματογένεσης και πρόκληση εμμηνόπαυσης.
- Διαταραχές της εμβρυογένεσης (ιδιαίτερα κατά την ηλικία της 8ης - 15ης εβδομάδας του εμβρύου).
- Πνευμονία (μετά από μεγάλες δόσεις).
- Φλεγμονές σε όλα σχεδόν τα λειτουργικά συστήματα (πεπτικό, απεκκριτικό, κ.λπ.).
- Ηπατίτιδα στο σκύωτι ακόμα και σε μέτριες δόσεις.
- Καταράκτη στους οφθαλμούς.
- Ελάττωση της αποδοτικότητας (φυσικής και διανοητικής).
- Επιτάχυνση της γήρανσης.

4.12. Επιπτώσεις στα φυτά

Το στρόντιο -90 και το καίσιο -137 απορροφώνται από τα κολλοειδή του εδάφους, ενώ η απορροφητικότητα τους από τα οστά είναι μεγαλύτερη για το στρόντιο -90 απ' ότι για το ιώδιο -131, το βάριο -140 και το καίσιο -137 (απορροφάται περίπου το 1/10.000.000 από τη συγκέντρωση στο έδαφος). Η απορρόφηση του στρόντιου συναγωνίζεται εκείνη του ασβεστίου· έτσι σε εδάφη πλούσια σε ασβέστιο η απορρόφηση στρόντιου είναι μικρή (τέτοια εδάφη είναι τα Ελληνικά, ενώ στην Κεντρική Ευρώπη το ασβέστιο είναι λίγο δηλ. είναι όξινα). Το καίσιο όταν απορροφηθεί από το φυτό μπορεί να παραμείνει για 30 - 100 μέρες προσβάλλοντας έτσι και τα ζώα ή τον άνθρωπο που θα τύχει να το χρησιμοποιήσουν για τροφή. Το ιώδιο - 131 με χρόνο υποδιπλασιασμού ραδιενέργειας 8 μέρες δεν προλαβαίνει να μολύνει το φυτό απορροφούμενο από τις ρίζες, αλλά μολύνει επιφανειακά, τα φύλλα και τους καρπούς. Ζώα που θα καταναλώσουν τα αντίστοιχα μολυσμένα φυτά συσσωρεύουν το ιώδιο -131 στο γάλα τους αμέσως.

4.13. Ραδιοπροστασία

Είναι το σύνολο των μεθόδων (φυσικών, χημικών, βιολογικών, ιατρικών) που χρησιμοποιούνται για την εξάλειψη των δυσμενών επιπτώσεων της ιονίζουσας ακτινοβολίας στον άνθρωπο και στους άλλους ζωντανούς οργανισμούς. Οι σχετικές διεθνείς επιτροπές που έχουν ιδρυθεί (NRPB - National Radiation Protection Board, I.C.R.P. - International Commission for Radiation Protection) (UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) και (BEIR - Committee-biological effects of ionizin), έχουν καθορίσει τα επιτρεπόμενα όρια για κάθε ιστό και κάθε ραδιονουκλίδιο (βλ. κεφ. 2.6.). Η λήψη μέτρων μετά από έκθεση εξ' αιτίας πυρηνικού ατυχήματος είναι πάντα πολύπλοκη αφού η προσβολή και αλλοίωση των κυττάρων είναι ταχύτατη. Υπάρχουν ό-

μως περιπτώσεις μείωσης των επιπτώσεων όπως π.χ. κατά την πρόσληψη ιωδίου -131 από τον θυροειδή όπου σε μεγάλες δόσεις (π.χ. συγκέντρωση ραδιενέργειας μεγαλύτερη από $4.500 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ την ημέρα) συνίσταται η λήψη ιωδίου με τη μορφή διακίων ιωδιοχίου καλίου (KJ) που απορροφάται από τα κύτταρα του θυροειδή (που συνθέτουν την ορμόνη θυροξίνη), ώστε να μη χρειάζεται να προσλάβουν το ραδιενεργό ιώδιο -131 που υπάρχει στην ατμόσφαιρα ή σε τροφές λόγω ραδιομόλυνσης. Τα άτομα που παίρνουν φάρμακα αντιθυροειδικά («θυροσταρ»), ή θυροξίνη (ορμόνη του αδένα) δεν προσλαμβάνουν καθόλου ιώδιο (και φυσικά ούτε ιώδιο -131) και έτσι δεν χρειάζεται η χορήγηση ιωδίου σε καμιά περίπτωση.

Σχετικά με τα άλλα ραδιονουκλίδια η προστασία για την υγεία του ανθρώπου εξαρτάται από τη συγκεκριμένη ραδιομόλυνση και απορροφητικότητα τους από το έδαφος και τις τροφές που θα παραχθούν από τα αναπτυσσόμενα φυτά. Σε σοβαρές ραδιομολύνσεις επιβάλλεται ακόμη και η απομάκρυνση (αποφλοιώση) του επιφανειακού στρώματος εδάφους με την προϋπόθεση ότι δεν έχουν εισχωρήσει σε μεγάλο βάθος (π.χ. λόγω βροχής) τα διάφορα ραδιονουκλίδια.

4.14. ΡΑΔΙΟ - ΟΙΚΟΛΟΓΙΑ

Όλοι οι οργανισμοί πάνω στη Γη αναπτύχθηκαν με την παρουσία ιονίζουσας ακτινοβολίας, η επίδραση της οποίας μπορεί να μελετηθεί σε επίπεδο *οικοσυστήματος* και όχι στο εργαστήριο. Οι ραδιο - οικολογικές επιπτώσεις γίνονται αντιληπτές σε σχέση με την εναλλαγή εποχών και ενδεχόμενα βιοτόπων για ένα συγκεκριμένο πληθυσμό ειδών, που οπωσδήποτε συνεπάγεται μεταβολές στην έκθεση απέναντι στις ιονίζουσες ακτινοβολίες (κοσμική και γήινη). Π.χ. κατά τη χειμερινή περίοδο τα περισσότερα ζώα, αλλά και ο άνθρωπος, ζουν σε κλειστούς χώρους, όπου η ακτινοβολία προέρχεται κυρίως από ορυκτά. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να επισημανθεί η αυξημένη ακτινοβολία που υπάρχει σε πολλές περιοχές της Γης: εκεί, τα αντίστοιχα οικοσυστήματα υφίστανται τις επιπτώσεις αυξημένης δόσης. Ακόμα, η συσχέτιση της ακτινοβολίας από ραδιενεργούς πυρήνες με τους μηχανισμούς της *Φυσικής Επιλογής* δεν θα πρέπει να παραλειφθεί από την όλη θεώρηση της εξέλιξης των ειδών. Είναι σίγουρο πως δεν είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε ποιά θα ήταν η σημερινή μορφή και κατανομή των ειδών αν η ιονίζουσα ακτινοβολία είχε *μηδενική δόση* από την αρχή της εμφάνισης της ζωής (πολλοί μάλιστα διερωτώνται αν θα μπορούσε να ευνοηθεί ο σχηματισμός των πρώτων βιομορίων χωρίς καθόλου παρουσία ακτινοβολίας). Η ευαισθησία των ειδών απέναντι στις ιονίζουσες ακτινοβολίες είναι συνάρτηση πολλών παραμέτρων όπως η θερμοκρασία (π.χ. θερμοάιμοι οργανισμοί είναι περισσότερο ευαίσθητοι) και το μέγεθος (π.χ. μονοκύτταροι οργανισμοί είναι περισσότερο ανθεκτικοί από ένα πολυκύτταρο). Ακόμα, είναι γνωστό ότι οι φυτικοί οργανισμοί είναι περισσότερο ανθεκτικοί από τους ζωικούς. Η διαφορά αυτή ραδιοευαισθησίας ανάμεσα στους διάφορους πληθυσμούς έχει προφανώς προεκτάσεις στην επιβίωσή τους όταν εκτεθούν σε ιονίζουσες ακτινοβολίες από κάποιο πυρηνικό ατύχημα, ή άλλο πυρηνικό ολοκαύτωμα που βεβαίως απευχόμεθα να συμβεί.

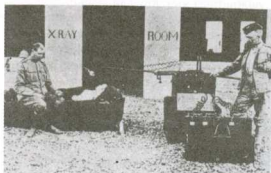
Κεφάλαιο 5: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΙΟΝΙΖΟΥΣΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ

Η πορεία της εξέλιξης των Βιολογικών και Ιατρικών Επιστημών μέχρι σήμερα έχει καταδείξει ότι κάθε φορά που η Φυσική έρευνα προσθέτει νέες θεωρητικές ή τεχνολογικές γνώσεις, ανοίγει ένας νέος κόσμος Βιο-ιατρικών εφαρμογών. Έτσι ακριβώς έγινε και με τις εξελίξεις της Φυσικής στον Τομέα της ανακάλυψης των ιονιζουσών ακτινοβολιών, των ακτίνων Χ, των ραδιοϊσοτόπων και της δυνατότητας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την ενέργεια που ελευθερώνεται με την πυρηνική σχάση. Το τελευταίο βέβαια, σε συνδυασμό και με την κατασκευή πυρηνικών όπλων μας αφορά άμεσα επειδή οι επιπτώσεις από διαρροή ραδιενεργών στοιχείων είναι τρομακτικές και απειλούν με αφανισμό το ανθρώπινο γένος.

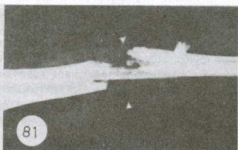
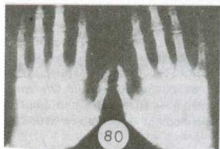
Στο κεφάλαιο αυτό θα δούμε πρώτα τις πολλαπλές και χρήσιμες εφαρμογές των ακτίνων -Χ κυρίως στη Διαγνωστική (αφού η χρήση τους στην ανάλυση της δομής βιομορίων αποτελεί αντικείμενο άλλης ενότητας). Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στα *ραδιενεργά ισότοπα* που η χρήση τους συνεχώς αυξάνεται καθώς ανακαλύπτονται και νέες εφαρμογές. Επειδή οι ιονίζουσες ακτινοβολίες έχουν καταστρεπτικές επιπτώσεις στα κύτταρα, από πολύ παλαιά έχουν χρησιμοποιηθεί για *θεραπευτικούς* σκοπούς. Τέλος θα γίνει μια αναφορά σε επιπτώσεις από *πυρηνικά ατυχήματα* (είτε προέρχονται από ειρηνικές είτε από πολεμικές εφαρμογές) και θα καταλήξουμε με συζήτηση της θέσης που έχουν οι ιονίζουσες ακτινοβολίες στη σημερινή *ποιότητα ζωής* του ανθρώπου.

5.1. Εφαρμογές των ακτίνων -Χ

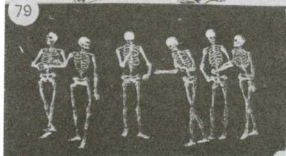
Σχεδόν αμέσως μετά την ανακάλυψη των ακτίνων -Χ στα 1895, άρχισαν, με πρωτόγονα φυσικά μέσα οι ιατρικές εφαρμογές (εικ. 78) και δεν άργησε να αποδειχθεί πως οι αόρατες αυτές ακτίνες που διαπερνούν πολύ εύκολα τα μαλακά μέρη του σώματος μπορούν να ανιχνεύσουν οποιαδήποτε ανωμαλία του σκελετικού συστήματος (εικ. 79-81) ή και επιπρόσθετη εναπόθεση αλάτων που κι' αυτά (όπως τα οστά) ανακόπτουν την πορεία των ακτίνων (εικ. 82). Βέβαια οι ακτίνες -Χ ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής τους (βλ. κεφ. 2.1) δηλ. με αλλαγή του



Εικ. 78: Πρωτόγνη συσκευή ακτίνων-Χ που χρησιμοποιήθηκε κατά τις στρατιωτικές επιχειρήσεις της Βρετανίας στα Σουδάν στα 1898

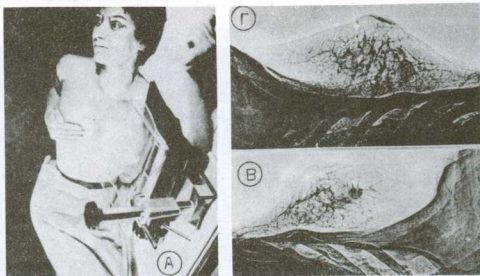


Εικ. 79-82: Δυνατότητες των ακτίνων-Χ να παρουσιάζουν τη μορφή του σκελετικού συστήματος και να αποκαλύπτουν την ύπαρξη ανωμαλιών όπως είναι η ύπαρξη κατάγματος (εικ. 81) ή ασβεστοποιημένου όγκου σε ωσθήκη (εικ. 82).

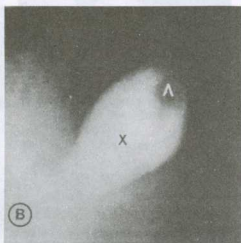
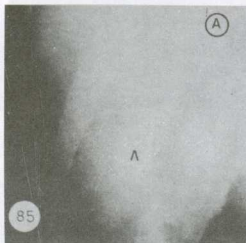
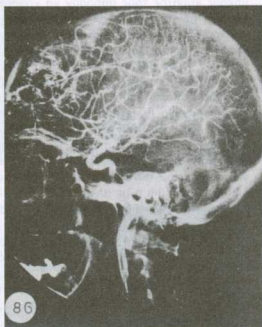


μήκους κύματός τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για ανίχνευση μαλακών μορίων, με χρήση «μαλακών ακτίνων -X» όπως π.χ. για την εύρεση όγκων του μαστού (μαστογραφία) (εικ. 83) ή και μυικών ανωμαλιών. Επειδή όπως αναφέρθηκε η τελική εικόνα της ακτινογραφίας εξαρτάται από την απορρόφηση των ακτίνων -X σε βιολογικά συστατικά (π.χ. οστά) ήταν λογικό να βρεθούν τρόποι τεχνητής (εξωγενούς), αύξησης της απορρόφησης αυτής με «ακτινοσκιερές» ουσίες δηλ. ουσίες που εισαγόμενες στον οργανισμό θα μπορούσαν να μπουν σε κάποιο όργανο ή σε ένα σύστημα (π.χ. πεπτικό) ώστε να ανιχνευτούν πιθανές βλάβες. Έτσι άρχισαν (στα 1931) να χρησιμοποιούνται ενώσεις βαρίου (μη τοξικές) που με πρόσληψη από το στόμα μπορούν να δείξουν στις ακτινογραφίες όλο το πεπτικό σύστημα (εικ. 84) (η είσοδος βέβαια μπορεί να γίνει και από την έδρα για έλεγχο του παχέος εντέρου). Είσοδος άλλου ακτινοσκιερού υλικού (π.χ. ιωδίου) ενδοφλέβια ή με άλλο τρόπο μπορεί να αποκαλύψει ανωμαλίες λειτουργίας άλλων οργάνων, όπως νεφρών, χοληδόχου κύστης, (εικ. 85), ουροποιητικού συστήματος, αγγείων, (εικ. 86).

Επειδή στις μεθόδους απεικόνισης που αναφέραμε χρησιμοποιείται η συνολική απορρόφηση των ακτίνων -X από ολόκληρο το πάχος του σώματος που βρίσκεται στην πορεία των ακτίνων -X, είναι προφανές ότι έτσι δεν μπορούν να ξεχωριστούν ιστοί που επικαλύπτονται και γι' αυτό έχει εφευρεθεί η τεχνική της **τομογραφίας**, όπου γίνεται μετακίνηση της πηγής ακτίνων -X, δηλ. λήψη και επα-

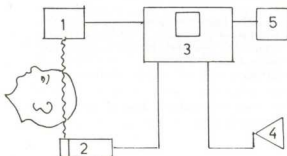


Εικ. 83: Χρησιμοποιώντας μαλακές ακτίνες-X και ειδικό ηλεκτροστατικό φύλλο, γίνεται η παρατήρηση μαλακών μορίων όπως αυτή η μαστογραφία, που αποκαλύπτει την ύπαρξη καρκινώματος (εικ. Γ). Η μέθοδος λέγεται «Ξηρογραφία». Χρησιμοποιούνται ακτίνες-X με 25-40 Kν και σχετικά μεγάλες δόσεις γι' αυτό και η εξέταση πρέπει να γίνεται όπου είναι απόλυτα αναγκαία.

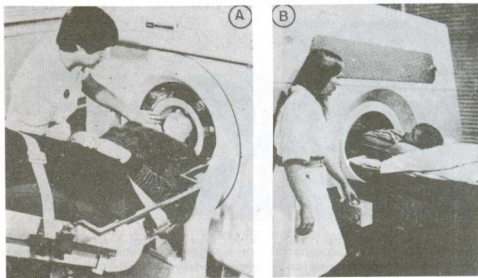


Εικ. 84-86: Χρήσιμοποίηση ακτινοσκιερού υλικού για τη μελέτη του πεπτικού συστήματος (Εικ. 84) των αγγείων (Εικ. 86) καθώς και της χοληδόχου κύστης (Εικ. 85) με χολολιθίαση (Α: χωρίς ακτινοσκιερό υλικό, Β: με ακτινοσκιερό υλικό ιωδίου που αποταμιεύεται στη χοληδόχο κύστη). (Χ: χοληδόχος κύστη, Λ: λίθος).

νασύσταση πολλαπλών ακτινογραφιών που οδηγεί σε τελική απεικόνιση μιας **τομής** του σώματος. Βελτιωμένη παραλλαγή της διαδικασίας αυτής είναι η **αξονική τομογραφία** όπου γίνεται *περιστροφή* της πηγής ακτίνων -X με αντίστοιχη και αντιδιαμετρική περιστροφή ενός οργάνου-ανιχνευτή (μετρητή σπινθηρισμού-βλ. κεφ. 2.5.3), που μετράει την ένταση των ακτίνων μετά τη διέλευση από το σώμα) (CAT-computer axial tomography) (βλ. εικ. 87-91). Η παρεμβολή ηλεκτρονικού υπολογιστή είναι απαραίτητη για την ανάλυση της έντασης των ακτίνων -X από κάθε γωνία (μπορούν να γίνουν 20.000 - 40.000 εκθέσεις) και τη σύνθεση για λήψη της τελικής τομογραφικής εικόνας. Με κατάλληλους ηλεκτρονικούς χειρισμούς είναι δυνατή η απεικόνιση διαφορετικών λεπτομερειών (εικ. 92). Η χρήση της αξονικής τομογραφίας είναι μεγάλη στην ανίχνευση και στην απεικόνιση του σχήματος και της θέσης των διαφόρων οργάνων.



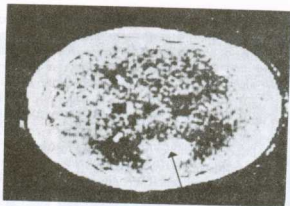
Εικ. 87: Διαγραμματική απεικόνιση των τμημάτων από τα οποία αποτελείται ένας αξονικός τομογράφος: 1: πηγή ακτίνων-X, 2: ανιχνευτής NaI (TI), 3: ηλεκτρονικός υπολογιστής, 4: οθόνη παρατήρησης, 5: εκτυπωτής.



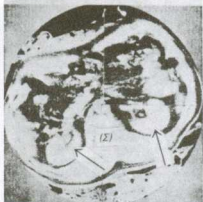
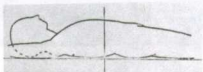
Εικ. 88: Συσκευές αξονικού τομογράφου. Α: Για τομογραφία εγκεφάλου, Β: Για τομογραφία σώματος. Και στις δύο περιπτώσεις η συσκευή ακτίνων-X περιστρέφεται αντιδιαμετρικά με τον ανιχνευτή NaI (TI).



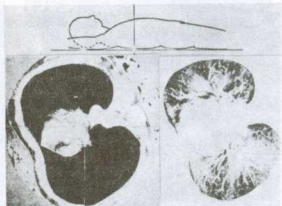
Εικ. 89: Διαγραμματική απεικόνιση των «τομών» που μπορούν να εξεταστούν με τον τομογράφο.



Εικ. 90: «Τομή» εγκεφάλου με αξονικό τομογράφο· διακρίνεται η ύπαρξη ακτινοσκιεράς περιοχής (βέλος) που πιθανότατα αντιπροσωπεύει ανωμαλία συσσώρευσης ιστών.



Εικ. 91: Χαρακτηριστική «τομή» στο μέσον περίπου του σώματος· διακρίνεται η σπονδυλική στήλη (Σ), οι δύο νεφροί (βέλη) και άλλα εσωτερικά όργανα.



Εικ. 92: Χρησιμοποιώντας διαφορετική ηλεκτρονική επεξεργασία είναι δυνατή η αποκάλυψη διαφορετικών λεπτομερειών σε κάθε «τομή».

Προφυλάξεις: Επειδή οι ακτίνες -X σαν ιονίζουσα ακτινοβολία προκαλούν, απορροφούμενες, ιονισμούς στα βιολογικά μόρια, γι' αυτό η χρήση τους πρέπει να περιορίζεται όπου είναι απόλυτα αναγκαία, όσο μικρή κι αν είναι η έκθεση, αφού από βιολογικής άποψης απόλυτα ασφαλής είναι μόνο η *μηδενική δόση*. Με άλλα λόγια θα πρέπει οι «κίνδυνοι» από την έκθεση στην ακτινοβολία να μην είναι μεγαλύτεροι από το «όφελος» που προκύπτει από την ακτινογραφία ή την ακτινοσκόπηση ή οποιαδήποτε άλλη μέθοδο περιλαμβάνει έκθεση του οργανισμού ή τμήμα του σε ιονίζουσες ακτινοβολίες (π.χ. 2 mrad για ακτινογραφία θώρακος αλλά 650 mrad σε ακτινογραφίες πεπτικού συστήματος και 1-2 rad σε αξονική τομογραφία).

Πρέπει να αποφεύγονται οι ακτινογραφήσεις εγκύων ιδιαίτερα μεταξύ 8ης και 15ης εβδομάδας από τη σύλληψη.

Για τις παιδιατρικές ακτινολογικές εξετάσεις πρέπει να χρησιμοποιούνται, αν είναι δυνατόν, ενισχυτικές διατάξεις και πολύ ευαίσθητες πλάκες ώστε να μειώνεται στο ελάχιστο, η έκθεση, ιδιαίτερα, στην περιοχή των γεννητικών οργάνων.

Τέλος, οι ακτινοσκοπήσεις (δηλ. παρατηρήσεις των οργάνων του σώματος με ακτίνες -X) πρέπει να γίνονται μόνο όταν είναι απόλυτα αναγκαίες και πάντα με συσκευή που διαθέτει ενισχυτή εικόνας, ώστε να περιορίζεται η έκθεση στο ελάχιστο δυνατό και να μην υπερβαίνει τα 5 R/λεπτό.

5.2. Ιχνηθέτες — Ραδιενεργά Ισότοπα

Εκτός από τις ακτίνες -X που χρησιμοποιούνται στην απεικόνιση του μεγέθους και σχήματος των εσωτερικών οργάνων του σώματος, γίνεται εκτεταμένη χρήση ραδιενεργών ουσιών (ραδιοφάρμακα), που εισαγόμενα στον οργανισμό δίνουν πληροφορίες για το σχήμα, το μέγεθος, αλλά και, το σπουδαιότερο, τη λειτουργία των διαφόρων οργάνων. Η χρήση βέβαια των ραδιοϊσοτόπων δεν έχει καμιά σχέση με τη χρήση των ακτίνων -X εκτός του ότι και οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται, όπως άλλωστε και πολλές άλλες (π.χ. υπέρηχοι — υπερηχογράφημα) για διαγνωστικούς σκοπούς στον άνθρωπο. Ας δούμε όμως τα πράγματα από την αρχή.

Ιστορικό: Στα 1896 ο Becquerel ανακοίνωσε στην Ακαδημία Επιστημών της Γαλλίας τις πρώτες παρατηρήσεις για την ακτινοβολία του ορυκτού πηκουανίτη. Μετά τις έρευνες-σταθμό στην ιστορία της ανθρωπότητας για την ύπαρξη *φυσικής ραδιενέργειας*, από την Μαρία Σκλοντόβσκα-Κιουρί και τον άντρα της Πέτρο Κιουρί, οι διάδοχοί τους Ειρήνη Κιουρί και Φρειδερίκος Ζολιό έδειξαν πως είναι δυνατή η τεχνητή δημιουργία ραδιενεργών «ισοτόπων», δηλ. ατόμων (νουκλιδίων) που εμφανίζουν το φαινόμενο της ραδιενέργειας (διασπάσεις στη μονάδα του χρόνου) και έχουν τις ίδιες ιδιότητες με αντίστοιχα (ίδιου ατομικού αριθμού = ίδιου τόπου στον περιοδικό πίνακα των στοιχείων) φυσικά στοιχεία. Έτσι ακολούθησε η παραγωγή *ραδιενεργού ιωδίου* που σχεδόν αμέσως χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της λειτουργίας του θυρεοειδή αδένα, αφού ήταν δυνατόν με ένα

μετρητή Geiger να βρεθεί η ποσότητα πρόσληψης ιωδίου σε ασθενείς με υποψία υπερ- ή υπο-θυρεοειδισμού.

Αργότερα έγινε δυνατή η παρασκευή ισotόπων από άλλα στοιχεία χάρη στο *κυκλοτρόνιο* (επιταχυντής σωματιδίων-βλ. εικ. 14) που κατασκευάστηκε στα 1931 από τον Lawrence στην California· έτσι έγιναν τα ισotόπα κάλιο-42, νάτριο-24 και φωσφόρος-32.

Η εφαρμογή των ισotόπων στην Ιατρική αποτέλεσε επανάσταση μέσα από την έρευνα πολλών άξιων ερευνητών, όπως του Ούγγρου Χημικού Hevesy (εικ. 93) (βραβείο Nobel, 1943) και άλλων. Στη Βιολογία οι εφαρμογές ήταν επίσης επαναστατικές αφού με τα ισotόπα μπορούσαν να ανιχνευθούν στα κύτταρα πολύ σημαντικές λειτουργίες, όπως είναι ο διπλασιασμός του DNA, η μεταγραφή του DNA σε RNA, η σύνθεση των πρωτεϊνών, η εντόπιση υποδοχέων, η κατανομή διοξειδίου του άνθρακα στα φυτά κ.ά.

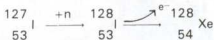


Εικ. 93: Ο Ούγγρος χημικός Hevesy (βραβείο Nobel Χημείας 1943) πρωτοπόρος στην εφαρμογή των Ραδιοισotόπων στη Βιολογία και στην Ιατρική.

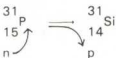
Επειδή όμως η ιονίζουσα ακτινοβολία (α,β,γ) που προέρχεται από τη διάσπαση των ισotόπων εκτός από την ιδιότητα της να ανιχνεύεται με κατάλληλες τεχνικές (μετρητές, φιλμ, γαλακτώματα), έχει παράλληλα βλαβερές (μέχρι θανατηφόρες) επιδράσεις (αρκεί να αναφέρουμε τα εγκαύματα του Becquerel και τη λευχαιμία της Μαρίας Κιουρί), έγινε πολύ γρήγορα αντιληπτό πως θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για *θεραπευτικούς* σκοπούς. Έτσι είναι δυνατή η συγκέντρωση της ακτινοβολίας από τη ραδιενέργεια των ισotόπων σε έναν ισotό-στόχο που είναι παθολογικός ώστε να γίνει καταστροφή του. Με κατάλληλες συνθήκες επιλογής του ισotόπου και της δόσης είναι δυνατόν να παραμείνουν ανέπαφα από την ακτινοβολία τα υγιή κύτταρα του οργανισμού.

5.2.1. Παρασκευή Ραδιοϊσοτόπων

Η δημιουργία νέων τεχνητών ραδιοϊσοτόπων ήταν αποτέλεσμα πειραματικών και θεωρητικών ερευνών του Ερρίκου Φέρμι (Enrico Fermi) στα 1934, όταν κατόρθωσε «βομβαρδίζοντας» με νετρόνια τα άτομα ιωδίου-127 να παράγει άτομα ιωδίου-128 που ήταν ασταθή με χρόνο ημιζωής 25 min. Το ιώδιο-128 στη συνέχεια μετατρέπεται σε Ξένον-128 (Xe-128) ελευθερώνοντας ένα ηλεκτρόνιο (και μετατρέποντας ένα νετρόνιο σε πρωτόνιο), δηλ.

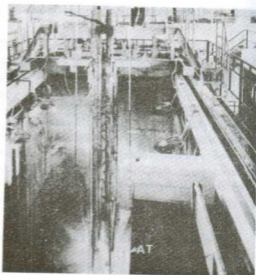
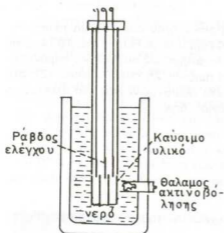


Ένα άλλο παράδειγμα είναι η «μεταστοιχείωση» του φωσφόρου-31 (P-31), σε πυρίτιο-31 (Si-31).



Η σύνθεση τεχνητών ραδιονουκλιδίων είχε αρχίσει βέβαια ένα χρόνο πριν (1933) από την Irene Curie (κόρη της Μαρίας Κιουρί) και του άντρα της Frederic Joliot όταν έκαναν πειράματα ακτινοβόλησης διαφόρων ουσιών με σωματίδια άλφα. Η χρήση όμως των νετρονίων πολλαπλασίασε την αποδοτικότητα στην παραγωγή νέων ραδιοϊσοτόπων. Ο Fermi παρήγαγε νετρόνια βομβαρδίζοντας άτομα βηρυλίου με α-σωματίδια που εκπέμπονται από αέριο ραδόνιο. Πολλά ραδιοϊσότοπα (ραδιονουκλίδια) μπορούν σήμερα να παραχθούν στους πυρηνικούς αντιδραστήρες κατά δύο τρόπους: Πρώτα, υπάρχει, μεγάλη ροή νετρονίων στην καρδιά του αντιδραστήρα και έτσι κάθε ουσία που τοποθετείται εκεί γίνεται ραδιοϊσότοπο με το βομβαρδισμό από τα νετρόνια αυτά, (εικ. 94). Δεύτερο, ένας μεγάλος αριθμός ραδιονουκλιδίων δημιουργούνται σαν προϊόντα σχάσεως του ουρανίου μέσα στον αντιδραστήρα.

Στην Ελλάδα υπάρχει ο αντιδραστήρας του Κέντρου Πυρηνικών ερευνών «Δημόκριτος», που είναι τύπου ανοικτής δεξαμενής (εικ. 95) και χρησιμοποιεί σαν σχάσιμο υλικό φυσικό ουράνιο εμπλουτισμένο κατά 20% σε ουράνιο-235. Έχει μέγιστη θερμική ισχύ 5 MW, κρίσιμη μάζα 3,3 Kg U-235 και χρησιμοποιεί νερό σαν επιβραδυντή της λειτουργίας του. Ετέθη σε λειτουργία τον Ιούλιο του 1961 και χρησιμοποιείται έκτοτε για ερευνητικούς σκοπούς αλλά και για εφαρμογές όπως είναι η παραγωγή ραδιοϊσοτόπων (π.χ. τεχνητό-99m καθώς και ιώδιο-131, Φωσφόρο-32, χρυσό-198, χρώμιο-51, ύτριο-90, ιρίδιο-92) που είναι απαραίτητα στην ακτινοδιαγνωστική και την ακτινοθεραπεία στη χώρα μας.



Εικ. 94,95: Σχηματική παράσταση και φωτογραφία πυρηνικού αντιδραστήρα, τύπου κολυμβητικής δεξαμενής (Κ.Π.Ε. Δημόκριτος), ισχύος 5 MW. Διακρίνεται η ακτινοβολία Τσερένκοφ (AT).

5.2.2. Φυσικές ιδιότητες ραδιενεργών στοιχείων και ισotόπων

Όπως πρώτος ο Ερρίκος Μπεκερέλ παρατήρησε στο τέλος του προηγούμενου αιώνα υπάρχουν φυσικά στοιχεία τα οποία εμφανίζουν το φαινόμενο της *ραδιενέργειας* δηλ. της εκπομπής σωματιδίων-α, σωματιδίων-β, (ηλεκτρονίων) και φωτονίων (ακτινοβολίας)-γ. Τέτοια στοιχεία με φυσική ραδιενέργεια είναι πολλά και κατατάσσονται σε «οικογένειες», π.χ. οικογένεια Θορίου-232, οικογένεια ακτινίου, οικογένεια ουρανίου-238. Και στις τρεις περιπτώσεις τελικό προϊόν μετά από διαδοχικές «μεταστοιχειώσεις» είναι ο σταθερός (μη ραδιενεργός) μόλυβδος-206.

Χαρακτηριστικές ιδιότητες των ραδιενεργών στοιχείων αυτών είναι 1) το είδος της ακτινοβολίας ή των σωματιδίων που εκπέμπουν διασπώμενα και 2) ο χρόνος υποδιπλασιασμού της ραδιενέργειας (βλ. Πίνακες III, V, XXI).

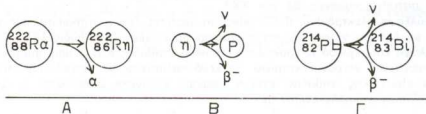
1) Είδος εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ή σωματιδίων

Από τα φυσικά ραδιενεργά στοιχεία εκπέμπονται *σωματίδια-α* (πυρήνες ηλίου δηλ. σύμπλεγμα δύο πρωτονίων και δύο νετρονίων), *σωματίδια-β* (δηλ. ηλεκτρόνια) και ακτινοβολία-γ. Στην πρώτη περίπτωση είναι σχετικά απλή η κα-

ΠΑΝΑΚΑΣ XXI. Φυσικά χαρακτηριστικά των κυριώτερων Ραδιοϊσοτόπων που χρησιμοποιούνται για διαγνωστικούς σκοπούς.

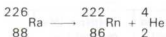
Σύμβολο	Φυσική Ημιπερίοδος	Τρόπος Διάσπασης	Μέγιστη ενέργεια σωματ.-β (MeV)	Ενέργεια (MeV) φωτονίων-γ
H-3	12,3 χρόνια	β^-	0,018	—
C-14	5570 χρόνια	β^-	0,158	—
F-18	109 λεπτά	β^+, EC	0,63	0,51
P-32	14,2 μέρες	β^-	1,7	—
K-42	12,5 ώρες	β^-, γ	2-3,6	1,51
Ca-47	4,5 μέρες	β^-, γ	0,67-1,98	1,31
Cr-51	27,8 μέρες	EC, γ	—	0,32
Fe-59	45 μέρες	β^-, γ	0,27-0,47	1,1-1,3
Co-57	270 μέρες	EC, γ	—	0,12
Co-58	71 μέρες	EC, β^+, γ	0,47	0,51-0,81
Cu-64	12,8 ώρες	β^-, β^+, EC	0,57	0,66
Ga-67	78 ώρες	EC, γ	—	0,09, 0,18, 0,30
Se-75	120 μέρες	EC, γ	—	0,14, 0,27, 0,28
Kr-85	10,5 χρόνια	β^-, γ	0,67, 0,83	0,15, 0,30
Sr-85	65 μέρες	EC, γ	—	0,51
Tc-99m	6 ώρες	IT	—	0,14
In-111	2,81 μέρες	EC, γ	—	0,173-0,247
In-113m	100 λεπτά	IT	—	0,39 (36% IC)
I-125	59,9 μέρες	EC, γ	—	0,035
I-131	8 μέρες	β^-, γ	0,61	0,36
I-132	2,3 ώρες	β^-, γ	1,2, 1,5, 2,1	0,63-0,68, 0,78
Xe-133	5,3 μέρες	β^-, γ	0,35	0,081
Cs-131	9,7 μέρες	EC	—	0,06-0,30
Yb-169	32 μέρες	EC, γ	—	0,06-0,20
Au-198	2,7 μέρες	β^-, γ	0,96	0,41
Hg-197	65 ώρες	EC, IT, γ	—	0,077
Hg-203	47 μέρες	β^-, γ	0,21	0,28

EC: Electron capture (Σύλληψη ηλεκτρονίου)
 IC: Internal conversion (Εσωτερική μετατροπή)
 IT: Isomeric transition (Ισομερής μετάπτωση)

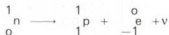


Εικ. 96: Εκπομπή σωματιδίων και φωτονίων κατά τη ραδιενεργή διάσπαση ραδιοϊσοτόπων.

τανόηση του φαινομένου αφού π.χ. από τον ασταθή ραδιενεργό πυρήνα γίνεται εκτόξευση δύο πρωτονίων και δύο νετρονίων. Παράδειγμα:

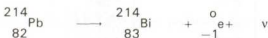


Πρόκειται δηλαδή για τη ραδιενεργή μετατροπή του ραδίου-226 σε ραδόνιο-222 με ταυτόχρονη εκκίνηση σωματιδίων-α (εικ. 96Α). Η εκπομπή όμως σωματιδίων-β από τον πυρήνα (που είναι δεδομένη γιατί έχει παρατηρηθεί) δεν μπορεί εύκολα να εξηγηθεί αφού ο πυρήνας σε φυσιολογική κατάσταση δεν περιέχει σωματίδια-β (ηλεκτρόνια). Όλα όμως τα πειραματικά στοιχεία καθώς και η θεωρητική επεξεργασία που έχει γίνει προτείνουν πως συμβαίνει μετατροπή ενός νετρονίου σε πρωτόνιο με ταυτόχρονο «σχηματισμό» σωματιδίου-β (που εκτινάσσεται) και νετρίνου που είναι ουδέτερο στοιχειώδες σωματίδιο με αμελητέα μάζα (εικ. 96Β):



Κατά συνέπεια στην περίπτωση αυτή δεν μεταβάλλεται ο μαζικός αριθμός του ατόμου (το άθροισμα πρωτονίων-νετρονίων) αλλά αυξάνει ο ατομικός αριθμός (εικ. 96Γ).

Παράδειγμα:



Πολλές φορές, αμέσως μετά την εκκίνηση του σωματιδίου-α ή -β ο πυρήνας αποκτά (προσωρινά) σταθερότητα εκπέμποντας φωτόνιο-γ. Συνεπώς τα φωτόνια-γ (όπου υπάρχουν) συνοδεύονται σχεδόν πάντα από σωματίδια-α ή σωματίδια-β (βλ. Πίνακα ΙΙΙ). Τα τρία αυτά στοιχεία της ραδιενεργού μετατροπής αναφέρονται και σαν *ιονίζουσα ακτινοβολία* που περιλαμβάνει βέβαια και άλλα σωματίδια ή ακτινοβολίες όπως είναι τα πρωτόνια, τα μεσόνια (μίνια, πόνια, καόνια), διάφορα ιόντα, ακτίνες-Χ, κ.ά.

Υπάρχουν ακόμη οι εξής τρόποι εκπομπής ακτινοβολίας και σωματιδίων-β από ασταθείς πυρήνες (βλ. πίν. XXI):

— **Σύλληψη ηλεκτρονίου:** (E.C. = electron capture). Πραγματοποιείται από πυρήνες με έλλειμμα νετρονίων και περίσσεια πρωτονίων (π.χ. Ιώδιο-125). Γίνεται σύλληψη εσωτερικού τροχιακού ηλεκτρονίου (στιβάδας K ή L) από πρωτόνιο και δημιουργείται νετρόνιο+νετρίνιο. Το κενό καλύπτεται με μετακίνηση ηλεκτρονίων εξωτερικής στιβάδας, ενώ η διαφορά ενέργειας αποβάλλεται με μορφή φωτονίου-γ χαμηλής ενέργειας:



– **Ισομερής μετάπτωση:** (I.T. = isomeric transition). Πραγματοποιείται από μετα-σταθείς πυρήνες (π.χ. Τεχνητίο-99m, βλ. πίνακα XXI) και συνίσταται στην αποβολή φωτονίου-γ.

– **Εσωτερική μετατροπή:** (I.C. = internal conversion). Πρόκειται για εκπομπή τροχιακών ηλεκτρονίων που εκδιώχθηκαν από φωτόνιο-γ του πυρήνα (εσωτερικό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο). Τα ηλεκτρόνια αυτά είναι μόνο-ενεργειακά και προέρχονται από εσωτερική στιβάδα. Το κενό που δημιουργείται μπορεί να καλυφθεί από ηλεκτρόνιο μεγαλύτερης τροχιάς με ταυτόχρονη εκπομπή φωτονίου-γ χαμηλής ενέργειας. Αυτό με τη σειρά του μπορεί να εκδιώξει ηλεκτρόνιο εξωτερικής στιβάδας (ηλεκτρόνια Auger).

Συνδυασμός «ισομερούς μετάπτωσης» και «εσωτερικής μετατροπής» συμβαίνει στο τεχνητίο-99m (βλ. παρακάτω).

2) Χρόνος υποδιπλασιασμού της ραδιενέργειας

Η ραδιενέργεια δηλ. το πηλίκον $\Delta N/\Delta t$ αντικπροσωπεύει το ρυθμό εκπομπής σωματιδίων και ακτινοβολίας που μόλις αναφέραμε και μπορεί να είναι πολύ μεγάλος, π.χ. από ένα γραμμάριο ραδίου-226 εκτινάσσονται 36,7 δισεκατομμύρια σωματίδια -α ανά δευτερόλεπτο και ίδιος αριθμός φωτονίων -γ (βλ. παρακάτω).

Ονομάζουμε *χρόνο υποδιπλασιασμού* τη χρονική περίοδο T κατά την οποία διασπάται (δηλ. εκπέμπει τα αντίστοιχα σωματίδια ή τα φωτόνια -γ) ο μισός αριθμός ραδιενεργών πυρήνων (νουκλιδίων) (εικ. 32).

Αν N είναι ο αριθμός των πυρήνων σε χρονική στιγμή t και λ είναι μια σταθερά που ονομάζεται σταθερά διασπάσεως, τότε ισχύει:

$$-\Delta N = \lambda \cdot N \cdot \Delta t \text{ δηλαδή } \frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda \cdot N \quad \text{ή}$$

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \text{ (νόμος των ραδιενεργών μετατροπών)}$$

Το πηλίκον $\Delta N/\Delta t$ που δείχνει το ρυθμό διασπάσεων ονομάζεται *ραδιενέργεια* και αποτελεί χαρακτηριστικό φυσικό μέγεθος ασταθών πυρήνων που υπάρχουν στη φύση ή που παράγονται τεχνητά.

Ένα άλλο φυσικό μέγεθος είναι ο *μέσος χρόνος ζωής* (τ) που εκφράζει το κλάσμα N_0/e (όπου $e = 2,72$).

Ισχύει: $\tau = 1/\lambda = 1,44 T$ και $T = 0,693/\lambda$ που αποδεικνύεται αν $N = 1/2 N_0$ οπότε $t = T$.

Παραδείγματα:

1) Πόσα νουκλίδια ραδίου διασπώνται ανά δευτερόλεπτο από 1 γραμμάριο ουσίας;

Χρόνος υποδιπλασιασμού $T = 1.620$ χρόνια και

Ατομικό βάρος = 226

Έχουμε $N = m \cdot NA$ (όπου NA ο αριθμός Avogadro) και $m = 1/226$ γραμμόατομα, οπότε:

$$N = \frac{1}{226} \cdot 6.023 \cdot 10^{23} = 2.67 \cdot 10^{21}$$

άτομα ραδίου που περιέχονται σε 1 gr ουσίας. Από αυτά τα άτομα ένα ποσοστό διασπάται όπως ορίζεται από το χρόνο υποδιπλασιασμού T . Ισχύει: $T = 0.693/\lambda$ και

$$\lambda = \frac{0.693}{T} = \frac{0.693}{1620 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ sec}} = 1,356 \cdot 10^{-11} \text{ sec}^{-1}$$

Τέλος από τη σχέση

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N$$

υπολογίζουμε τον αριθμό διασπάσεων ΔN για το χρόνο $\Delta t = 1 \text{ sec}$

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -1356 \cdot 10^{-11} \text{ sec}^{-1} \cdot 2.67 \cdot 10^{21} = 3.62 \cdot 10^{10} \text{ νουκλidia/sec.}$$

Επειδή κατά τις διασπάσεις αυτές παράγονται σωματίδια α και φωτόνια γ ο παραπάνω αριθμός δείχνει πως από 1 γραμμάρια ραδίου εκπέμπονται 36 δισεκατομμύρια σωματίδια α και άλλα τόσα φωτόνια γ ανά δευτερόλεπτο (!).

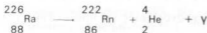
2) Αν ένα ραδιενεργό παρασκεύασμα περιέχει $N = 10^{12}$ ραδιονουκλidia με χρόνο υποδιπλασιασμού $T = 1$ ώρα πόσα άτομα διασπώνται σε κάθε δευτερόλεπτο;

Ισχύει:

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N \text{ δηλαδή } -\Delta N = \lambda \cdot N \cdot \Delta t \text{ και επειδή } -\Delta N = \frac{0.693}{T} \cdot N \cdot \Delta t$$

$$\text{έχουμε } \frac{\Delta N}{\Delta t} = 1,9 \cdot 10^8 \text{ άτομα}$$

3) Παρασκεύασμα περιέχει 1mg ραδιενεργού ραδίου-226 που διασπάται:



Πόσα σωματίδια α εκπέμπονται/sec όταν ο χρόνος υποδιπλασιασμού $T = 1.620$ χρόνια και $\lambda = 1,36 \cdot 10^{-11} \text{ sec}^{-1}$

- Σε 1 mg = 10^{-3} gr ραδίου περιέχονται άτομα

$$N = \frac{6.025 \cdot 10^{23} \text{ άτομα/γραμμόατομα}}{226 \text{ gr/γραμμόατομα}} \cdot 10^{-3} \text{ gr} = 2.665 \cdot 10^{18} \text{ άτομα}$$

Ο αριθμός τώρα των σωματιδίων -α που ελευθερώνονται ανά δευτερόλεπτο είναι ίδιος με τον αριθμό των ατόμων ραδίου που διασπώνται δηλ.:

$$-\Delta N = \lambda \cdot N \Delta t = 1,36 \cdot 10^{-11} \text{ sec}^{-1} \cdot 2,665 \cdot 10^{18} \text{ άτομα} \cdot 1 \text{ sec} = 3,62 \cdot 10^7 \text{ σωματίδια } -\alpha.$$

4) Αν από 0,1 gr ουρανίου -238 εκπέμπονται/sec περίπου 1.240 σωματίδια -α, να υπολογιστούν η σταθερά διάσπασης λ , Ο χρόνος υποδιπλασιασμού T και ο μέσος χρόνος ζωής τ .
- Στην ποσότητα, 0,1 gr υπάρχουν:

$$N = \frac{6,025 \cdot 10^{23} \text{ άτομα/γραμμόατομο} \cdot 0,1}{238/\text{γραμμόατομο}} = 253,2 \cdot 10^{18} \text{ άτομα.}$$

Ο αριθμός των εκπεπομένων σωματιδίων -α είναι ίδιος με τον αριθμό των διασπασθέντων ατόμων ουρανίων-238. Δηλ. ισχύει:

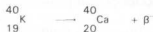
$$\Delta N = -\lambda \cdot N \cdot \Delta t \quad \text{ή } \lambda = -\frac{\Delta N}{N \cdot \Delta t} = 4,897 \cdot 10^{-18} \text{ sec}^{-1}$$

(αφού $\Delta N = 1,240$ άτομα, $N = 253,2 \cdot 10^{18}$ άτομα και $\Delta t = 1 \text{ sec}$).
Ο χρόνος υποδιπλασιασμού είναι:

$$T = \frac{0,693}{\lambda} = 4,5 \cdot 10^9 \text{ χρόνια}$$

$$\text{και ο μέσος όρος ζωής } \tau = \frac{1}{\lambda} = 6,5 \cdot 10^9 \text{ χρόνια.}$$

5) Ένας άνθρωπος βάρους 70 Kgr περιέχει 0,170 kg Καλίου από το οποίο ένα ποσοστό 0,012% είναι ραδιενεργό. Τα ασταθή άτομα Καλίου-40 διασπώνται κατά 89% με χρόνο υποδιπλασιασμού $T = 1,3 \cdot 10^9$ χρόνια ως εξής:



Τα υπόλοιπα 11% μεταπίπτουν με σύλληψη ηλεκτρονίων σε αργό-40. Πόσες διασπάσεις καλίου -40 και πόσες συλλήψεις ηλεκτρονίων συμβαίνουν στον οργανισμό σε κάθε λεπτό;

- Σε 0,17kg καλίου περιέχονται $0,17 \cdot 0,012 \cdot 10^{-2} = 2,04 \cdot 10^{-5} \text{ Kg}$ καλίου-40. Κατά συνέπεια ο αριθμός N των ατόμων K-40 θα είναι:

$$N = \frac{6,025 \cdot 10^{23} \text{ άτομα/γραμμόατομο}}{40 \text{ Kgr/γραμμόατομο}} \cdot 2,04 \cdot 10^{-2} \text{ gr} = 3,07 \cdot 10^{20} \text{ άτομα}$$

$$\text{Οι διασπάσεις/μίν θα είναι: } \frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda \cdot N = \frac{0,693}{T} \cdot N$$

$$\text{δηλ.: } \frac{\Delta N}{\Delta t} = 2,71 \cdot 10^5 \text{ διασπάσεις/μίν}$$

Ο αριθμός αυτός δείχνει και τις συλλήψεις ηλεκτρονίων.

β) Πόση είναι η μάζα και ο αριθμός ατόμων ουρανίου-238 που παρουσιάζουν ραδιενέργεια 0,5 μC αν ο χρόνος υποδιπλασιασμού είναι $T = 4,45 \cdot 10^9$ χρόνια;

— Γνωρίζουμε ότι $1C = 3,7 \cdot 10^{10}$ διασπάσεις/sec

Συνεπώς η ραδιενέργεια 0,5 μC αντιστοιχεί με

$$A = 0,5 \cdot 3,7 \cdot 10^4 = 1,85 \cdot 10^4 \text{ διασπάσεις/sec}$$

Ισχύει όμως $A = \lambda \cdot N$ όπου:

$$\lambda = \frac{0,693}{T} \text{ και συνεπώς}$$

$$N = \frac{A \cdot T}{0,693} = 37,5 \cdot 10^{20} \text{ άτομα}$$

Η μάζα m των ατόμων αυτών θα είναι:

$$m = \frac{238 \text{ gr/γραμμοάτομο}}{6,025 \cdot 10^{23} \text{ άτομα/γραμμοάτομο}} \cdot 37,5 \cdot 10^{20} \text{ άτομα} = 1,5 \text{ gr}$$

7) Κατά την μετατροπή νετρονίου σε πρωτόνιο με ταυτόχρονο σχηματισμό ηλεκτρονίου ελευθερώνεται ενέργεια, η οποία μπορεί να υπολογιστεί αφού η μάζα του πρωτονίου είναι:

$m_p = 1,67239 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$ και η μάζα του νετρονίου είναι:

$m_n = 1,67470 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$, ενώ η μάζα του ηλεκτρονίου είναι:

$m_e = 9,1083 \cdot 10^{-31} \text{ Kg}$

Κατά την πυρηνική αντίδραση $n \rightarrow p + e$ προκαλείται έλλειμμα μάζας $\Delta m = m_n - m_p - m_e$ που υπολογίζεται σε $13,9917 \cdot 10^{-31} \text{ Kg}$.

Αυτό αντιστοιχεί σε ενέργεια $E = \Delta m \cdot c^2 = 0,786 \text{ Mev}$ περίπου (εκπομπή φωτονίου-γ).

5.2.3. Βιοϊατρικές εφαρμογές Ραδιοϊσοτόπων

Οι εφαρμογές των ισοτόπων αυτών είναι τεράστιες σε θέματα διαγνωστικής και θεραπείας στην Ιατρική (Πυρηνική Ιατρική) καθώς και σε θέματα βασικής ή εφαρμοσμένης Βιολογικής έρευνας.

Η χρήση των ραδιοϊσοτόπων στη Βιο-ιατρική στηρίζεται σε δύο βασικές αρχές:

Πρώτα, κάθε ραδιοϊσότοπο έχει τις ίδιες χημικές ιδιότητες με το σταθερό άτομο, π.χ. ιώδιο-131 (ραδιενεργό), ιώδιο-127 (σταθερή μορφή). Δεύτερο, η παρουσία των ραδιοϊσοτόπων αυτών και η ποσοτική τους εκτίμηση μπορούν να βρεθούν με ακρίβεια με τη βοήθεια κατάλληλων μεθόδων δηλ. μετρητών ακτινοβολίας β και γ. Έτσι τα ραδιοϊσότοπα χρησιμοποιούνται:

α) στην **ανίχνευση** κυτταρικών συστατικών και λειτουργιών, όπως π.χ. η πρωτεϊνσύνθεση (χρησιμοποίηση ραδιενεργού αμινοξέος), ο διπλασιασμός του DNA (χρησιμοποίηση ραδιενεργού θυμιδίνης), η μεταγραφή του DNA (χρησιμοποίηση ραδιενεργού ουρακίλης) κ.λ.π.

β) στην **εκτίμηση** της αποδοτικότητας λειτουργίας ενός οργάνου του σώματος, χρησιμοποιώντας, ειδικό ραδιενεργό ισότοπο που συμμετέχει στη λειτουργία του οργάνου, π.χ. χρήση ιωδίου-131 για ανίχνευση της λειτουργίας του θυρεοειδούς.

γ) στην **ανίχνευση** της αλληλουχίας μετασχηματισμών που συμβαίνουν σε μια κυτταρική ουσία κατά το μεταβολισμό της.

δ) στη **μελέτη** της κατανομής μιας ουσίας σε έναν ιστό, όργανο, ή σε ένα κύτταρο ή ακόμη και σε ολόκληρο τον οργανισμό.

ε) στη **μέτρηση** της συγκέντρωσης μιας ουσίας σε έναν ιστό, όργανο, κύτταρο ή και στην κυκλοφορία του αίματος.

στ) κατά τη **θεραπεία** καρκινικών κυττάρων όπου γίνεται χρήση ραδιοϊσοτόπων που συγκεντρώνονται στο συγκεκριμένο ιστό-στόχο και τον ακτινοβολούν με μεγάλη δόση.

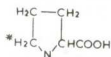
Βιολογικές εφαρμογές

Για την επίλυση βιολογικών προβλημάτων σημαντικότερα είναι τα ισότοπα: Υδρογόνο-3 (τρίτιο), άνθρακας-14, φωσφόρος-32, θειάφι-35 και ιώδιο-125 (Πίνακας XXII). Τα ισότοπα αυτά συνήθως «επισημαίνουν» πρόδρομα βιολογικά μόρια, π.χ. τριτιωμένη προλίνη (εικ. 97) όπου το τρίτιο έχει αντικαταστήσει το κανονικό υδρογόνο στο πέμπτο άτομο άνθρακα του αμινοξέος αυτού.

ΠΙΝΑΚΑΣ XXII. Φυσικά χαρακτηριστικά ραδιοϊσοτόπων που χρησιμοποιούνται στη βιολογική έρευνα.

Ραδιονουκλίδιο	Χρόνος υποδιπλασιασμού	Ενέργεια σωματιδίων-β (Mev)		Ειδική ενεργότητα mc/mM		Θυγατρικό νουκλίδιο (σταθερό)
		Μέγιστη	Μέση	Μέγιστη	συνήθης	
Τρίτιο (H-3)	12,26 χρόνια	0,018	0,0057	3×10^4	10^2-10^4	Ήλιο-3
Άνθρακας-14	5.700 χρόνια	0,159	0,050	64	$1-10^2$	Άζωτο-14
Θειάφι-35	87,2 μέρες	0,167	0,049	$1,5 \times 10^6$	$1-10^2$	Χλώριο-35
Χλώριο-36	3×10^5 χρόνια	0,714	0,3	1,2	$10^{-3}-10^{-1}$	Αργό-36
Φωσφόρος-32	14,3 μέρες	1,71	0,69	9×10^6	$10-10^2$	Θειάφι-32
Ιώδιο-131	8,04 μέρες	0,81	0,19	$1,7 \times 10^7$	10^2-10^4	Ξένον-131
Ιώδιο-125	60 μέρες	Σύλληψη ηλεκτρονίων		$2,2 \times 10^6$	10^2-10^4	Τελοούριο-125

Σημείωση: Φωτόνια-γ εκπέμπονται από το Ιώδιο-131 (0,4-1,3 Mev) και το Ιώδιο-125 (0,056 Mev).



Εικ. 97: Το μόριο της προλίνης επισημασμένο με τρίτιο (αστερίσκος).

Στις ενώσεις αυτές βέβαια συμβαίνει το φαινόμενο της αυτοραδιόλυσης αφού η ιονίζουσα ακτινοβολία που εκπέμπεται μπορεί να δημιουργήσει ελεύθερες ρίζες με τις γνωστές καταστρεπτικές συνέπειες (βλ. κεφ. 3), γι' αυτό και πρέπει να γίνεται διατήρησή τους σε χαμηλή θερμοκρασία. Ο ρυθμός διάσπασης έτσι δεν ξεπερνά το 0,5% μηνιαίως.

Τα ραδιοϊσότοπα που χρησιμοποιούνται για επισήμανση βιολογικών μικρο-ή μακρο-μορίων χαρακτηρίζονται από το μέγεθος που ονομάζεται *ειδική ενεργότητα* (specific activity) που εκφράζει την ποσότητα ραδιενέργειας που περιέχεται ανά γραμμομόριο (ή γραμμάριο) της ουσίας και εκφράζεται σε mC/mM ή σε mC/mg.

Παράδειγμα: 10 mC/mM τριτωμένης προλίνης ($^3\text{H-Pro}$) σημαίνει: $10 \times 37 \times 10^6$ Bq/mM = 370×10^6 διασπάσεις/δευτερόλεπτο και χιλιοστογραμμομόριο (1 mM = $6,023 \times 10^{18}$ μόρια) δηλαδή

$$\frac{3,7 \times 10^8}{6,023 \times 10^{18}} = 5 \times 10^{-11} \text{ διασπάσεις/sec ανά μόριο προλίνης}$$

δηλαδή εκπομπή σωματιδίων-β.

Τα ισότοπα τρίτιο (H-3) και άνθρακα-14 (C14) είναι αυτά που χρησιμοποιούνται περισσότερο στη Βιολογική έρευνα, με επισήμανση διαφόρων «πρόδρομων» μορίων (π.χ. αμινοξέων, σακχάρων, λιπιδίων, βάσεων DNA).

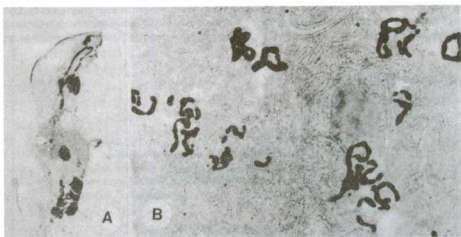
Τα χαρακτηριστικά τους (βλ. πίνακα XXII) είναι διαφορετικά ως προς την ενέργεια των σωματιδίων-β που εκπέμπουν. Έτσι το τρίτιο με μέγιστη ενέργεια-β = 18 Kev (δηλ. όσο και τα ηλεκτρόνια μιας οθόνης τηλεόρασης) χρησιμοποιείται όπου η ενσωμάτωση του επισημασμένου πρόδρομου μορίου (δηλ. ο αριθμός πρόδρομων μορίων ανά μεγαλομόριο) είναι μεγάλη και όπου η μικρή εμβέλεια στους ιστούς (~ 5 μm) είναι επιθυμητή. Ο άνθρακα-14 εκπέμπει σωματίδια-β μεγαλύτερης ενέργειας (154 Kev) και έχει αντίστοιχα μεγαλύτερη εμβέλεια: έτσι προσφέρεται για επισήμανση μορίων με μικρή ενσωμάτωση και ιδιαίτερα όπου η *διπλή σήμανση* (double labeling) είναι αναγκαία. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να ξεχωρίσουμε στο ίδιο πείραμα τη βιοσύνθεση διαφορετικών μορίων αφού το ένα θα έχει ενσωματώσει τρίτιο και το άλλο άνθρακα-14. Αντίθετα με το τρίτιο, ο άνθρακα-14 δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτοραδιογραφία με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο γιατί η μεγάλη εμβέλεια των εκπεπομένων σωματιδίων-β δημιουργεί ασάφεια στην εντόπιση των σημασμένων μακρομορίων.

Συνοπτικά, τα ραδιοϊσότοπα στη Βιολογία χρησιμοποιούνται στις παρακάτω μεθόδους:

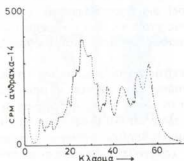
1) **Αυτοραδιογραφία** με φωτονικό ή ηλεκτρονικό μικροσκόπιο μετά από in vitro ή in vivo χορήγηση ραδιοσημασμένου πρόδρομου μορίου (εικ. 47 και 98), π.χ. $^3\text{H-Leu}$, $^3\text{H-Thy}$, $^3\text{H-Ala}$.

2) **Κλασμάτωση κυττάρου** και μέτρηση με «απαριθμητή» (counter) της ποσότητας ραδιενέργειας σε κυτταρικά κλάσματα, μετά από in vivo ή in vitro χορήγηση ραδιοσημασμένου πρόδρομου μορίου (εικ. 99).

3) **Ηλεκτροφόρηση** και αυτοραδιογραφία (μετά από ξήρανση του πηκτώματος) αφού προηγηθεί και πάλι χορήγηση ραδιοσημασμένου μορίου. Στην περίπτωση που έχει χορηγηθεί τρίτιο, χρησιμοποιείται η τεχνική της «αυτοσπινθηρογραφίας» (autoradiography) κατά την οποία ένα ενδιάμεσο μόριο (π.χ. P.P.O.) μετατρέπει τη χαμηλή ενέργεια των σωματιδίων-β σε φωτόνια τα οποία προσβάλλουν το φωτογραφικό φιλμ (εικ. 100).



Εικ. 98: Εντόπιση ραδιονουκλιδίων με μορφολογική αυτοραδιογραφία. Α: Τομή επίμυος μετά από χορήγηση ραδιοφάρμακου επισημασμένου με τεχνητίο-99m. Διακρίνεται η εντόπιση του ιστόπου σε εσωτερικά όργανα. (Προσφορά Δρ. Χ. Σάββα-Δημοπούλου). Β: Οι κόκκοι (βέλη) δείχνουν τις θέσεις των μακρομορίων που έχουν ενσωματώσει το επισημασμένο βιομόριο με ραδιονουκλίδιο (εδώ τριτιωμένη πραλίνη). (Προσφορά Δ. Μουζάκη).



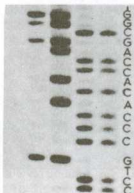
Εικ. 99: Κατανομή μακρομορίων που έχουν ενσωματώσει κατά τη βιοσύνθεσή τους πρόδρομο ραδιενεργό μόριο επισημασμένο με ραδιονουκλίδιο (εδώ άνθρακας-14). Μετά την κλασμάτωση έχει γίνει μέτρηση των κλασμάτων με «μετρητή υγρού σπινθηριστή» (liquid scintillation counter), όπου οι τιμές σε cpm μπορούν να μετατραπούν σε άρητ και από εκεί γνωρίζοντας την ειδική ενεργότητα του σημασμένου πρόδρομου μορίου μπορούμε να κάνουμε ποσοτική εκτίμηση (βλ. κεφ. 2.5).

4) Επισήμανση **μεμβρανικών πρωτεϊνών** με ιώδιο-125 και ανίχνευσή τους με ηλεκτροφόρηση ή άλλη μέθοδο (π.χ. τεχνική γαλακτουπεροξειδάσης).

5) **Επισήμανση (in vitro) μορίου DNA** με φωσφόρο-32 και ανάλυση της αλληλουχίας των βάσεων με ηλεκτροφόρηση (εικ. 101).

Εδώ η μεγάλη ενέργεια (1,71 Mev) αλλά και η εμβέλεια (9 μέτρα στον αέρα) των σωματιδίων-β του φωσφόρου-32 επιβάλλουν τη λήψη προστατευτικών μέτρων (όπως αναφέρεται αλλού) για όσο διάστημα διαρκεί η ραδιενεργός διάσπαση του (χρόνος υποδιπλασιασμού = 14,3 μέρες).

Εικ. 100: Εντόπιση ραδιονουκλιδίων με ηλεκτροφόρηση και αυτοραδιογραφία ή αυτοσπινθηρογραφία (βλ. κείμενο). Οι ζώνες δείχνουν τις θέσεις των πρωτεϊνών που ενσωμάτωσαν το επισήμασμένο με το ραδιονουκλίδιο (εδώ τρίτιο) πρόδρομο βιομόριο (εδώ προλίνη) (χρόνος έκθεσης 6 μέρες).

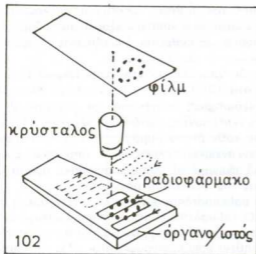


Εικ. 101: Εντόπιση αλληλουχίας βάσεων DNA του πλασμιδίου μετά από επισήμανσή τους με φωσφόρο-32, αντίδραση με διάφορα ένζυμα-rBR 322 ηλεκτροφόρηση και αυτοραδιογραφία (χρόνος έκθεσης 8 ώρες). (Προσφορά Ε. Λεκανιδού-Γ. Ροδάκης).

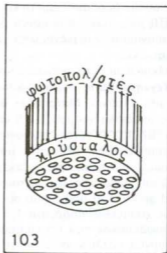
Χρήση των ραδιοϊσοτόπων στην Ιατρική

Όργανα τα οποία χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση των ραδιοϊσοτόπων στην Πυρηνική Ιατρική είναι εκτός του «μετρητή σπινθηρισμών» (scintillation counter) (βλ. κεφ. 2.5.3), ο *κινητός* (γραμμικός) *σπινθηρογράφος* με σάρωση (scanner) (εικ. 102), ο *ακίνητος* σπινθηρογράφος γνωστός σαν *γ-κάμερα* (gamma camera) (εικ. 103), ο *υπολογιστικός τομογράφος εκπομπής* και ο *φθορίζων τομογράφος*.

Ο σπινθηρογράφος με σάρωση χρησιμοποιείται για ανίχνευση της κατανομής ραδιονουκλιδίου (π.χ. τεχνητίο-99m) που χορηγήθηκε με κάποιο ραδιοφάρμακο ώστε να διερευνηθεί η λειτουργία συγκεκριμένου ιστού ή οργάνου (εικ. 104). Η «γ-κάμερα» που περιέχει μεγάλο κρύσταλλο NaI (TI) (~45 cm) «παρατηρεί» από απόσταση την εκπομπή φωτονίων-γ (με τη βοήθεια περίπου 40 φωτοπολλαπλασιαστών) από ραδιοφάρμακο που έχει χορηγηθεί: έτσι μπορεί να εντοπιστεί π.χ. η ύπαρξη εγκεφαλικού όγκου (εικ. 105). Ο υπολογιστικός τομογράφος στηρίζεται στην ίδια αρχή λειτουργίας με τον αξονικό τομογράφο, (βλ. εικ. 89) με τη διαφορά ότι δεν χρησιμοποιούνται ακτίνες-X αλλά εκπομπή φωτονίων-γ από το ραδιοφάρμακο που έχει χορηγηθεί. Εξετάζεται συνήθως η λειτουργία εσωτερικών οργάνων όπου ο γραμμικός σπινθηρογράφος και η γ-κάμερα δεν δίνουν ικανοποιητικές πληροφορίες. Τέλος ο «φθορίζων τομογράφος» χρησιμοποιείται για την εύρεση της κατανομής ιωδίου στον θυρεοειδή. Χρησιμοποιείται εκπομπή φωτονίων-γ μικρής ενέργειας 60 KeV (από Αμερίκιο-241), τα οποία διεγείρουν το σταθερό (μη ραδιενεργό) ιώδιο του θυρεοειδούς που έτσι εκπέμπει φωτόνια ενέργειας 27 KeV· αυτά ανιχνεύονται με κρύσταλλο NaI (TI) που βρίσκεται στο ίδιο όργανο. Περιορισμένη είναι η χρήση του «σπινθηρογράφου ποζιτρονίου»,



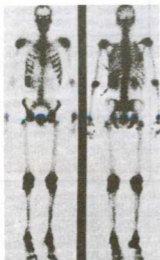
102



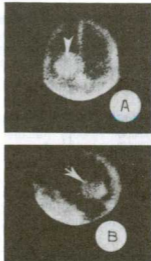
103

Εικ. 102: Αρχή λειτουργίας ανευετή σάρρωσης (scanner) κατά τη σπινθηρογράφηση μετά από χορήγηση ραδιοϊσοτόπων για εξέταση λειτουργίας ιστών και οργάνων.

Εικ. 103: Αρχή λειτουργίας γ-κάμερας που αποτελείται από κρύσταλλο NaI(Tl) και πολλούς φωτοπολλαπλασιαστές.



Εικ. 104: Τυπικό ολόσωμο σπινθηρογράφημα σάρρωσης μετά από χορήγηση ραδιοφάρμακου επισημασμένου με τεχνητό (Tc-99m). Η δεξιά και η αριστερή εικόνα έχουν ληφθεί από πίσω και από μπροστά αντίστοιχα.



Εικ. 105: Τυπικό σπινθηρογράφημα εγκεφάλου με γ-κάμερα μετά από χορήγηση υπερτεχνητίου. Α: οπίσθια όψη, Β: πλάγια όψη. Διακρίνεται συσσώρευση του ραδιοφάρμακου σε μια περιοχή (βέλος).

στον οποίο δύο αντιδιαμετρικοί, (από τον ασθενή) τοποθετημένοι κρύσταλλοι NaI (Tl) ανιχνεύουν την παραγωγή φωτονίων-γ από την εξάυλωση ποζιτρονίου-ηλεκτρονίου που περιέχουν τα ραδιοϊσότοπα άνθρακας-11, οξυγόνο-15, φθόριο-18 και άλλα.

Μερικά από τα ραδιοϊσότοπα που χρησιμοποιούνται στην Ιατρική είναι:

Τεχνήτιο-99m: Ανακαλύφθηκε στα 1930 κατά τον βομβαρδισμό Μολυβδενίου με νετρόνια. Μεταπίπτει με «εσωτερική μετάπτωση» σε Τεχνήτιο-99 σε χρόνο υποδιπλασιασμού $T = 6$ ώρες εκπέμποντας φωτόνια-γ ενέργειας 140 KeV. Για κάθε 1.000 τέτοια φωτόνια σε κάθε άτομο συμβαίνουν 116 «εσωτερικές μετατροπές» δηλ. εκπομπές μονοενεργειακών ηλεκτρονίων από εσωτερικούς φλοιούς (εσωτερικό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο). Χρησιμοποιήθηκε πρώτα στα 1963 για διάγνωση της λειτουργίας του θυρεοειδή αδένα.

Η χρήση του βραχύβιου αυτού ραδιοϊσοτόπου είναι πολύ εκτεταμένη (συνήθως χορηγείται ποσότητα 1-5 mCi ενδοφλεβίως) αφού μπορεί ανάλογα με το «ραδιοφάρμακο» που θα επισημάνει, να χρησιμοποιηθεί για την απεικόνιση της λειτουργίας πολλών ιστών με τη βοήθεια σπινθηρογραφήματος. Π.χ. το σύμπλοκο με πολυφωσφορικό απορροφάται από τα οστά, ενώ το σύμπλοκο με DTPA (διεθυλο-τριαμινοπεντοξικό οξύ) διοχετεύεται στο ουροποιητικό σύστημα (Πίνακας XXIII).

ΠΙΝΑΚΑΣ XXIII. Κλινική χρησιμοποίηση τεχνητίου-99m

Χημική μορφή	Χρήση	Δόση ολόσωμη rad/mCi	Δόση οργάνου rad/mCi
TcO_4^-	Σπινθηρογράφημα εγκεφάλου	0,001	Θυρεοειδής 0,1-0,5
Tc-κολλοειδές	» Θυρεοειδή	»	Παχύ έντερο 0,2
	» ήπατος/σπλήνα	0,01	Ήπαρ 0,3
	» μυελού των οστών	»	Μυελός οστών 0,026
Tc-Fe (OH) ₃	» Πνευμόνων	0,005	Σπλήνα 0,3
Tc-αλβουμίνη	» Πνευμόνων	0,01	Πνεύμονες 0,25
Tc-πολυφωσφορικά	» Οστών	0,045	Πνεύμονες 0,25
Tc-DTPA	» Ουροποιητικού	0,02	Κύστη 0,4

Εκτός του τεχνητίου-99 m χρησιμοποιείται και το ραδιοϊσότοπο **Ιώδιο-113m** για έλεγχο λειτουργίας ήπατος και πνευμόνων με σπινθηρογράφημα. Το ισότοπο αυτό έχει χρόνο ημιζωής 1,7 ώρες και εκπέμπει γ-φωτόνια ενέργειας 393 KeV. Η ιονική μορφή Ιωδίου -113m δεσμεύεται στη σφαιρίνη του πλάσματος, τρανσφερίνη και έτσι με το σπινθηρογράφημα ανιχνεύονται όλες οι θέσεις όπου κυκλοφορεί αίμα. Τέλος, σημαντική είναι η αξιοποίηση των ισωτόπων του ιωδίου για διαγνωστικούς σκοπούς από το 1938. Υπάρχουν συνολικά 24 ραδιοϊσότοπα ιωδίου με μάζα 117-139, αλλά μόνο τρία απ' αυτά έχουν κλινικές εφαρμογές: **ιώδιο-131**, **ιώδιο-125** και **ιώδιο-123**. Το πρώτο είναι το πιο διαδεδομένο, με

χρόνο υποδιπλασιασμού 8,05 ημέρες και κύρια εκπομπή φωτονίου-γ ενέργειας 364 Κev και σωματιδίου-β ενέργειας 608 Κev (βλ. Πίνακα XXIV), αν και το ιώδιο-123 είναι πολύ πιο κατάλληλο για εξέταση θυροειδούς αλλά παράγεται δύσκολα (σε κυκλοτρόνιο).

ΠΙΝΑΚΑΣ XXIV. Ιδιότητες ραδιοϊσότοπων ιωδίου

Ισότοπο/ημιζωή	Εκπομπή (ενέργεια Κev/%)		Μέθοδοι παραγωγής
	Σωματίδια -β	φωτόνια-γ	
Ιώδιο-131 (8,05 μέρες)	250/2.8	80/2.6	Ακτινοβόληση Τελοούριου-130 $^{130}\text{Te}(n,\gamma) \rightarrow ^{131m}\text{Te} \xrightarrow{30\text{hr}} ^{131}\text{I} + \beta^-$
	335/9.3	284/5.4	
	608/87.2	364/82	
	815/0.7	637/6.8	
		723/1.6	
Ιώδιο-125 (60 μέρες)	E.C.	28	Xe-125 -I-125 Ακτινοβόληση ^{121}Sb σε κυκλοτρόνιο
Ιώδιο-123 (13,3 ώρες)	E.C.	159/8	
		28/92	

E.C.: Electron capture (Σύλληψη ηλεκτρονίου) βλ. κεφ. 5.2.2

Η χορήγηση του ιωδίου για εξέταση θυροειδούς γίνεται σε ιονική μορφή ενδοφλεβίως αλλά χρησιμοποιούνται και άλλες μορφές όπως π.χ. σύμπλοκο με αλβουμίνη, με ιωδοχοληστερόλη κ.α. (βλ. Πίνακα XXV).

Η ποσότητα ιωδίου-131 που χρησιμοποιείται τοπικά στον θυροειδή για εξέταση της λειτουργίας του (σε άτομα πάνω από 20 ετών) φτάνει τα 10 mCi (δηλ. ισοδύναμη δόση 13.000 mgem).

Άλλες εφαρμογές: Η ακτινοβολία-γ από ραδιοϊσότοπα κοβαλτίου-60 και καϊσίου-137 έχει χρησιμοποιηθεί για την αποστείρωση τροφών ιδιαίτερα σε θερμές χώρες. Η εφαρμογή αυτή όμως έχει πρόσφατα υποστεί αυστηρή κριτική επειδή έχουν διαπιστωθεί α) καταστροφή βιταμινών σε τροφές και β) αύξηση ποσοστού καρκινογένεσης σε παιδιά που είχαν τραφεί με τέτοιες αποστειρωμένες τροφές. Οι ίδιες ακτινοβολίες χρησιμοποιούνται και για τη δημιουργία ανθεκτικών μορφών διαφόρων φυτικών προϊόντων και για την καταπολέμηση εντόμων με τη μέθοδο της στέρωσης των αρσενικών (SIT-sterile Insect Technique). Στη μέθοδο αυτή για την καταπολέμηση π.χ. του δάκου της ελιάς, γίνεται παραγωγή στέρων αρσενικών τα οποία διασπείρονται στον ελαιώνα και συναγωνίζονται τα φυσιολογικά (γόνιμα αρσενικά) στο ζευγάρισμα. Είναι προφανές ότι η γονιμότητα επηρεάζεται σημαντικά με αποτέλεσμα τη μείωση της προσβολής του καρπού της ελιάς από τα αυγά που γεννούν τα έντομα. Τα ραδιοϊσότοπα έχουν ακόμα χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της απορροφητικότητας λιπαμάτων από φυτά.

ΠΙΝΑΚΑΣ XXV. Κλινική χρησιμοποίηση (με σπινθηρογράφημα ή άλλη ανίχνευση ακτινοβολίας) ραδιοϊσοτόπων Ιωδίου.

Χημική μορφή	Χρήση	Ισότοπο	Δόση Ακτινοβόλησης (rad/mCi)		
			Ολόσωμη	Θυρεοειδής	Άλλος ιστός
Ιώδιο	Σπινθ/μα θυρεοειδούς και πρόσληψη	I-123	0,04	16	
		I-125	0,04	400-1400	
		I-131	0,5-3,5	1000-2000	
Ιώδιο-αλβουμίνη	Ποσότητα Πλάσματος	I-123	0,5-0,7		Αίμα (3)
		I-131	1-3	20-50	Αίμα (5-20)
Ιώδιο-MAA(macro-aggregated albumin)	Σπινθ/μα Πνευμόνων	I-125	0,01		Ήπαρ (0,2)
		I-131	0,1-0,4	70-200	Ήπαρ (0,5-2)
Ιώδιο-ιοθαλαμικό	Λειτουργία νεφρών	I-131	0,02		Νεφροί (0,4) Γονάδες (0,2)
Ιώδιο-Ιοδωχαληστερόλη	Επινεφρίδια	I-131	0,94		Επινεφρ. (49) Οσθήκες (21) Ήπαρ (7,1) Όρχεις (4,8)
Ιώδιο-ροζ Βεγκάλης	Λειτουργία Ηπατοκυττάρων (χοληφόρων οδών)	I-131	0,4-1		Ήπαρ (0,7-3)

5.2.4. Χειρισμός και Φύλαξη ραδιοϊσοτόπων

Τα ραδιοϊσότοπα πρέπει να φυλάσσονται σε κατάλληλο δοχείο η επιφάνεια του οποίου δεν πρέπει να έχει ρυθμό έκθεσης μεγαλύτερο από 2,5 mR/ώρα. *Ραδιενεργό υλικό* θεωρείται εκείνο που έχει ειδική ραδιενέργεια μεγαλύτερη από 70.000 Bq/Kg (δηλ. 2 nCi/g).

Επιφάνεια μολυσμένη από ραδιενέργεια θεωρείται εκείνη που έχει περισσότερο από 4Bq/cm² δηλ. 10⁻⁴ μCi/cm²) για β και γ ακτινοβολία ή 0,4 Bg/cm² για α ακτινοβολία (η διαφορά οφείλεται στο γεγονός ότι η ακτινοβολία α έχει συντελεστή ποιότητας Q δεκαπλάσιο από ό,τι οι ακτίνες γάμμα και τα σωματίδια βήτα).

Η αποβολή άχρηστων υγρών ραδιενεργών ουσιών πρέπει να γίνεται σε ειδικά δοχεία. Επιτρέπεται η χρησιμοποίηση κεντρικής αποχέτευσης μόνο όταν α) παράλληλα γίνεται ροή σημαντικής ποσότητας νερού, β) η μέγιστη συγκέντρωση των ραδιενεργών ουσιών σε οποιοδήποτε σημείο του αποχετευτικού δικτύου του εργαστηρίου δεν υπερβαίνει τα 0,1 μCi/ml γ) η ποσότητα ραδιενεργού υλικού που απορρίπτεται, δεν υπερβαίνει τα 0,5 mCi/ημέρα.

Η αποβολή άχρηστων στερεών ραδιενεργών ουσιών γίνεται σε ειδικά δοχεία που αποθηκεύονται με ευθύνη της Ε.Ε.Α.Ε. (Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής

Ενέργειας). Επιτρέπεται η απόρριψη σε κοινά δοχεία απορριμάτων μόνο αν α) δεν υπάρχουν ραδιοϊσότοπα με υψηλή ραδιοτοξικότητα (βλ. σχετικό πίνακα XXVII) β) κανένα μεμονωμένο αντικείμενο δεν περιέχει ποσότητα ραδιενέργειας μεγαλύτερη από 0,5 μCi , γ) η απορριπτόμενη ποσότητα δεν υπερβαίνει τα 3 μCi (σε όγκο τουλάχιστον 0,1 m^3).

Τα κατάλοιπα από μετρητή ραδιενέργειας υγρού σπινθηριστή (Liquid Scintillation Counters) μπορούν να αποβληθούν στο κοινό αποχετευτικό δίκτυο εφ' όσον η ποσότητα του περιεχομένου τριτίου (H-3) ή άνθρακα-14 (C-14) δεν υπερβαίνει τα 0,05 $\mu\text{Ci/gr}$. (Για άλλα ισότοπα ισχύουν όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως).

Ισότοπα με χρόνο υποδιπλασιασμού μέχρι 100 μέρες (π.χ. Ιώδιο-131) φυλάσσονται για μείωση της ραδιενέργειας σε ειδικούς χώρους.

Η διατήρηση ραδιοϊσοτόπων σε ερευνητικά εργαστήρια επιτρέπεται μετά από άδεια της αντίστοιχης αρμόδιας υπηρεσίας (Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας - Ε.Ε.Α.Ε. για την Ελλάδα), ενώ είναι απαραίτητη, σύμφωνα με διεθνή πρότυπα η ανάρτηση ενημερωτικών ετικετών όταν η συνολική ραδιενέργεια ενός ισότοπου, ξεπερνά μια ορισμένη τιμή (Πίνακας XXVI).

ΠΙΝΑΚΑΣ XXVI. Ποσότητες ραδιενέργειας πάνω από τις οποίες επιβάλλεται η χρήση ενημερωτικών ετικετών.

Ραδιονουκλίδιο	Ελάχιστη ποσότητα για χρήση ετικέτας στον αντίστοιχο χώρο (σε μCi)	Ελάχιστη ποσότητα για χρήση ετικέτας σε φυαλίδιο (σε μCi)
Χρώμιο-51	10.000	1.000
Τρίτιο (Υδρογόνο-3)	10.000	1.000
Θειάφι-35	1.000	100
Άνθρακας-14	1.000	100
Χαλκός-64	1.000	100
Ασβέστιο-45	100	10
Σίδηρος-59	100	100
Χρυσός-198	100	100
Φώσφορος-32	100	10
Κάλιο-42	100	10
Νάτριο-24	100	10
Καίσιο-137, Βάριο-137	100	10
Κοβάλτιο-60	10	1
Ιώδιο-125 και 131	10	10
Στρόντιο-90, Ύτριο-90	1	0,1
Ράδιο-226	0,1	0,01

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝ ΡΑΔΙΟΪΣΟΤΟΠΑ

Ομάδα ραδιοτοξικότητας	Κατηγορία A-1	Κατηγορία A-2	Κατηγορία A-3	Κατηγορία A-4
1	$\leq \text{mCi}$	$\leq 100 \mu\text{Ci}$	$\leq 1 \text{ mCi}$	$\geq 1 \text{ mCi}$
2	$\leq 100 \text{ MCi}$	$\leq 10 \mu\text{Ci}$	$\leq 100 \text{ mCi}$	$\geq 100 \text{ mCi}$
3	$\leq 10 \text{ mCi}$	$\leq 1 \text{ Ci}$	$\leq 10 \text{ Ci}$	$\geq 10 \text{ Ci}$
4	$\leq 1 \text{ Ci}$	$\leq 100 \text{ Ci}$	$\leq 1.000 \text{ Ci}$	$\geq 1.000 \text{ Ci}$



ΠΙΝΑΚΑΣ XXVII. Ραδιοτοξικότητα ραδιοϊσοτόπων

Πολύ μεγάλη ραδιοτοξικότητα (Ομάδα 1)

Ακτίνιο (Ac)-227	Αμερίκιο (Am)-243	Αμερίκιο (Am)-241
Πολώνιο (Po)-210	Μόλυβδος (Mb)-210	Πρωτακτίνιο (Pa)-231
Πλουτώνιο (Pu)-238	Πλουτώνιο (Pu)-241	Πλουτώνιο (Pu)-242
Πλουτώνιο (Pu)-239	Πλουτώνιο (Pu)-240	Ράδιο (Ra)-223
Ράδιο (Ra)-226	Ράδιο (Ra)-228	Θόριο (Th)-227
Θόριο (Th)-228	Θόριο (Th)-230	

Μεγάλη ραδιοτοξικότητα (Ομάδα 2)

Ακτίνιο (Ac)-228	Άργυρος (Ag)-110m	Βάριο (Ba)-140
Βισμούθιο (Bi)-207	Μπερκέλιο (Bk)-249	Καίσιο (Cs)-134
Καίσιο (Cs)-137	Διμήτριο (Ce)-144	Κάδμιο (Cd)-115m
Κοβάλτιο (Co)-56	Κοβάλτιο (Co)-60	Χλώριο (Cl)-36
Ασβέστιο (Ca)-45	Ευρώπιο (Eu)-154	Ιώδιο (I)-124
Ιώδιο (I)-126	Ιώδιο (I)-131	Νάτριο (Na)-22
Ιώδιο (I)-133	Ιρίδιο (Ir)-192	Στρόντιο (Sr)-89
Στρόντιο (Sr)-90	Ρουθίνιο (Ru)-106	Τελούριο (Te)-127m
Τιτάνιο (Ti)-204	Ουράνιο (U)-236	

Μέτρια ραδιοτοξικότητα (Ομάδα 3)

Χρυσός (Au)-193	Χρυσός (Au)-199	Άργυρος (Ag)-105,111
Αργό (Ar)-41	Αρσενικό (As)-73,74,75,76,77	
Βάριο (Ba)-131	Βηρύλιο (Be)-7	Βρώμιο (Br)-82
Βισμούθιο (Bi)-206,212	Άνδρακος (C)-14	Χλώριο (Cl)-38
Διμήτριο (Ce)-141,143	Ασβέστιο (Ca)-47	Χρώμιο (Cr)-51
Κοβάλτιο (Co)-57	Κοβάλτιο (Co)-58	Χαλκός (Cu)-64
Κάδμιο (Cd)-109,115	Καίσιο (Cs)-131,136	Φθόριο (F)-18
Σίδηρος (Fe)-52	Σίδηρος (Fe)-55	Σίδηρος (Fe)-59
Γάλιο (Ga)-72	Υδράργυρος (Hg)-197,197m, 203	
Ιώδιο (I)-130,132,134,135		Κάλιο (K)-42
Κάλιο (K)-43	Κρυπτό (Kr)-85m	Λανθάνιο (La)-140
Μαγγάνιο (Mn)-52	Μαγγάνιο (Mn)-56	Μολυβδένιο (Mo)-99
Νάτριο (Na)-24	Νικέλιο (Ni)-65	Νιόβιο (Nb)-93m,95
Φωσφόρος (P)-32	Παλλάδιο (Pd)-103,109	Μόλυβδος (Pb)-203
Ρουθίνιο (Ru)-97,103,105		Ρόδιο (Rh)-105
Ραδόνιο (Rn)-220,222	Πυρίτιο (Si)-31	Θείο (S)-35
Κασίτερος (Sn)-113,125		Τιτάνιο (Ti)-200,201,202
Θόριο (Th)-231		Τεχνήτιο (Tc)-96,97m,97,99
Τελούριο (Te)-125m,127,129,131m,132		Ψευδάργυρος (Zn)-65
Βολφράμιο (W)-181,185,187	Ξένον (Xe)-135	

Μικρή ραδιοτοξικότητα (Ομάδα 4)

Κοβάλτιο (Co)-58m	Υδρογόνο (H)-3
Ινδίο (In)-113m	Κρυπτόν (Kr)-85
Καίσιο (Cs)-134m,135	Νιόβιο (Nb)-97
Οξυγόνο (O)-15	Στρόντιο (Sr)-85
Τελούριο (Te)-96m,99m	Θόριο φυσικό
Ύτριο (Y)-91m	Ζιρκόνιο (Zr)-93
Ξένον (Xe)-131m, 133	Ουράνιο (U)-238
Ουράνιο φυσικό	

Ακολουθεί περιγραφή μερικών ραδιενεργών στοιχείων και ισότόπων:

Τεχνητό: $^{99m}_{43}\text{Tc}$. Είναι το πρώτο τεχνητό στοιχείο (εξ' ου και η ονομασία), που κατασκευάστηκε στα 1937 με ατομικό βομβαρδισμό μολυβδένιου. Αργότερα βρέθηκε σαν υποπροϊόν σχάσης του ουρανίου.

Πολώνιο: $^{210}_{84}\text{Po}$. Ανακαλύφθηκε σε ραδιενεργό ορυκτό πισουρανίτη από το ζεύγος Curie στα 1898 (το όνομα δόθηκε από την Μαρία Κιουρί για να τιμήσει την πατρίδα της).

Ραδόνιο: $^{222}_{86}\text{Rn}$. Ανακαλύφθηκε στα 1900. Είναι αέριο ραδιενεργό στοιχείο που εκπέμπεται από το ραδιενεργό ράδιο· αποσυντίθεται σε ραδιενεργό πολώνιο και εκπέμπει σωματίδια-α.

Ακτίνιο: $^{227}_{89}\text{Ac}$. Ανακαλύφθηκε στα 1899 στον πισουρανίτη από τη Μαρία Κιουρί. Έχει χρόνο υποδιπλασιασμού 22 χρόνια και αποσυντίθεται σε φράγκιο και σε ήλιο.

Θόριο: $^{937}_{90}\text{Th}$. Ανακαλύφθηκε στα 1828 και το όνομα ανήκει σε Σκανδιναυό Θεό πολέμου. Αποτελεί πηγή σχηματισμού ραδιενεργού ουρανίου σε καύσιμα πυρηνικών αντιδραστήρων.

Πλουτώνιο: $^{242}_{94}\text{Pu}$. Ανακαλύφθηκε στα 1940 και χρησιμοποιήθηκε σε ατομικές βόμβες.

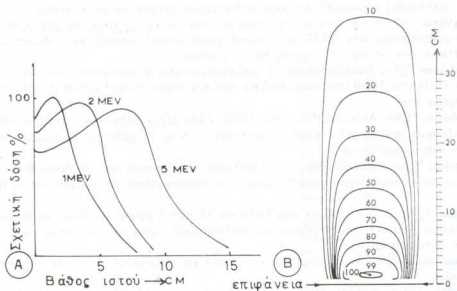
Κιούριο: $^{247}_{96}\text{Cm}$. Ανακαλύφθηκε στα 1944 και το όνομα δόθηκε για να τιμήσει το ζεύγος Μαρίας και Πέτρου Κιουρί. Αποτελεί προϊόν αποσύνθεσης του Αμερίκιου ($^{243}_{95}\text{Am}$) και έχει χρόνο υποδιπλασιασμού 19 χρόνια.

5.3. Ραδιοθεραπεία (Ακτινοθεραπεία)

Η θεραπευτική ικανότητα των ιονίζουσών ακτινοβολιών διαπιστώθηκε πολύ νωρίς (παράλληλα με τη βλαβερή τους επίδραση) αφού π.χ. ήδη τρία χρόνια μετά την ανάκαλυψη των ακτίνων-Χ αυτές χρησιμοποιήθηκαν για θεραπεία καρκινώματος.

Οι ιονίζουσες ακτινοβολίες χρησιμοποιούνται σε μεγάλη έκταση σήμερα για θεραπευτικούς σκοπούς. Η μέθοδος συνίσταται στην ακτινοβόληση μόνο των παθολογικών κυττάρων με κατάλληλη δόση ώστε να σκοτωθούν τα κύτταρα αυτά. Με σύγχρονες φυσικές μεθόδους μπορούμε να περιορίσουμε την πιθανότητα ακτινοβόλησης υγιών κυττάρων. Ακόμα, βρέθηκε εμπειρικά πως αν η ακτινοβολία δοθεί με τη μορφή επαναλαμβανόμενων μικρών δόσεων τότε τα υγιή κύτταρα επανακτούν τη λειτουργία τους πιο γρήγορα, από τα παθολογικά. Αυξάνοντας την ενέργεια των φωτονίων ή σωματιδίων αυξάνεται και το βάθος του μέγιστου ιονισμού δηλ. της μέγιστης δόσης (εικ. 106).

Χρησιμοποιείται κυρίως *Κοβάλτιο* (Co-60) (εικ. 107) και *καίσιο* (Cs-137). Π.χ. με 1.000 Ci κοβαλτίου έχουμε περίπου 1.200 rem μέσα σε έναν ιστό. Η τελική όμως έκθεση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες (όπως μέγεθος καρκινώματος, βάθος από την επιφάνεια του δέρματος κ.ά.). Χρησιμοποιούνται ακόμα γραμμικοί επιταχυντές (εικ. 108) καθώς και κυκλοτρόνια (εικ. 109). Το κοβάλτιο-60 έχει χρόνο υποδιπλασιασμού 5,26 χρόνια και εκπέμπει φωτόνια-γ υψηλής

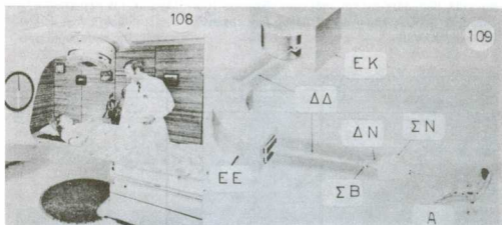


Εικ. 106: Α: Μεγιστοποίηση του αποτελέσματος κατά την ακτινοβόληση παθολογικών κυττάρων που βρίσκονται σε συγκεκριμένο βάθος από την επιφάνεια του δέρματος, με ρύθμιση της ενέργειας των φωτονίων ή σωματιδίων. Β: Ισοδοσικές καμπύλες που λαμβάνονται από δέση ακτίνων Χ, ενέργειας φωτονίων 6 Mev.



Εικ. 107: Μονάδα ακτινοθεραπείας με κοβάλτιο-60 για την ακτινοβόληση νεοπλασμάτων. Αφού υπολογισθεί η απαιτούμενη δόση τότε κατευθύνεται η ακτινοβολία-γ προς την αντίστοιχη περιοχή του σώματος. Άλλα ισότοπα που χρησιμοποιούνται για ακτινοθεραπεία είναι το ράδιο-226, το κάισιο-137, το ιρίδιο-192, ο χρυσός-198, το ιώδιο-125, το στρόντιο-90 (που βρίσκεται σε διαρκή ισορροπία με ύτριο-90) και το καλιφόρνιο-252.

ενέργειας 2,13 Mev και 1,87 Mev καθώς και σωματίδια-β με ενέργειες 2,37 Mev και 0,5 Mev. Ας σημειωθεί ότι η ταχύτητα σωματιδίων -β τέτοιων υψηλών ενεργειών προσεγγίζει την ταχύτητα του φωτός.



Εικ. 108: Ακτινοθεραπεία με τη βοήθεια γραμμικού επιταχυντή 4 Μev.

Εικ. 109: Κύκλοτρόνιο που παράγει δέσμη δευτερονίων τα οποία βομβαρδίζουν άτομα βηρυλλίου, τα οποία ελευθερώνουν νετρόνια για θεραπευτικούς σκοπούς. ΕΚ: Επιταχυντής κυκλοτρόνιο, ΔΔ: Δέσμη δευτερονίων, ΕΕ: Επιλογέας ενεργειών, ΣΒ: Στόχος βηρυλλίου, ΔΝ: Δέσμη νετρονίων, ΣΝ: Συγκεντρωτήρας νετρονίων, Α: Ασθενής.

Ραδιοθεραπεία γίνεται τόσο με εξωτερικές πηγές όπως αναφέρθηκε όσο και με εσωτερικές, όπως το ιώδιο-131 που χορηγείται εσωτερικά για θεραπεία καρκίνου του θυρεοειδή, αφού τα εκπεμπόμενα ηλεκτρόνια και οι ακτίνες γ καταστρέφουν τα παθολογικά κύτταρα. Η «κατευθυνόμενη» αυτή ραδιοθεραπεία είναι πολύ σημαντική για την αντιμετώπιση της νόσου.

Κατά τη ραδιοθεραπεία χρησιμοποιείται θεραπευτικός δείκτης που εκφράζει το κλάσμα των καταστραφέντων παθολογικών κυττάρων σε σχέση με τα καταστραφέντα φυσιολογικά κύτταρα. Για να έχει πρακτικό αποτέλεσμα η ραδιοθεραπεία πρέπει η τιμή του δείκτη να είναι > 1 και εξαρτάται από το είδος και την ένταση της ακτινοβολίας, καθώς και την μεταβολική κατάσταση των κυττάρων. Π.χ. πολλές φορές τα παθολογικά κύτταρα-στόχοι έχουν χαμηλότερη οξυγόνωση από τα γειτονικά φυσιολογικά και έτσι είναι λιγώτερο ευαίσθητα στην ακτινοβολήση. Για να γίνει εδώ σωστή ραδιοθεραπεία θα πρέπει να αυξήσουμε την ραδιοευαισθησία των παθολογικών κυττάρων π.χ. αυξάνοντας την περιεκτικότητά τους σε οξυγόνο. Οι ραδιοευαίσθητοποιητές μπορούν να επιδράσουν πριν (π.χ. ουσίες συγχρονισμού κυτταροδιαίρεσεων), κατά τη διάρκεια (π.χ. ουσίες παρέμβασης στο σχηματισμό των ελεύθερων ριζών), καθώς και μετά την ακτινοβολήση (π.χ. ουσίες που παρεμποδίζουν επανορθωτικές διαδικασίες).

Σε πολλές περιπτώσεις η ακτινοθεραπεία είναι κατά πολύ αποτελεσματικότερη από την χημειοθεραπεία ή τη χειρουργική επέμβαση (π.χ. καρκίνος του δέρματος, του λάρυγγος, του εγκεφάλου κ.ά.).

Σαν γενικός κανόνας ισχύει η ακτινοβολήση για 5 μέρες τη βδομάδα επί 4-8

συνεχείς βδομάδες αν και υπάρχουν ιδιομορφίες ανάλογα με την περίπτωση. Οι διάφορες μορφές καρκίνων εξ άλλου δεν εμφανίζονται εξ ίσου στα δύο φύλλα. (Πίνακας XXVIII).

ΠΙΝΑΚΑΣ XXVIII. Συχνότητες εμφάνισης διαφόρων μορφών καρκίνου

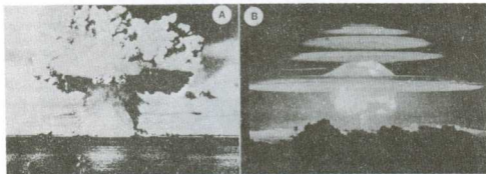
Πρόκληση καρκίνου	Άνδρας	Γυναίκα
Δέρματος	1%	1%
Λάρυγγα	5%	2%
Πνεύμονα	22%	6%
Μαστού	—	27%
Εντέρων	14%	15%
Προστάτη	17%	—
Μήτρας	—	14%
Λευχαιμίας	8%	7%
Απώλεια ζωής από καρκίνους		
Δέρματος	1%	1%
Λάρυγγας	3%	1%
Πνεύμονα	33%	11%
Μαστού	—	20%
Εντέρων	12%	15%
Προστάτη	9%	—
Μήτρας	—	7%
Λευχαιμίας	9%	9%

5.4. Ατομικά όπλα — Πυρηνικές δοκιμές

Μετά τη διάσπαση του ουρανίου από το Γερμανό Otto Hahn στα 1938 και τη θεωρητική προσέγγιση του Einstein ($E=mc^2$) σύμφωνα με την οποία, 0,4 mg Μάζας αντιστοιχούν με ενέργεια 10.000.000 βάττ η συγκέντρωση μεγάλης ποσότητας ουρανίου-235 (U-235) υπήρξε η απαρχή της κατασκευής ατομικής βόμβας όπου με αλυσωτές αντιδράσεις σχάσης μπορούσε να γίνει ελευθέρωση ραδιενεργών προϊόντων και μεγάλης ποσότητας θερμικής ενέργειας, όπως πραγματοποιήθηκε στη Χιροσίμα στις 6 Αυγούστου 1945. Η καταστρεπτικότητα είναι τεράστια γιατί γίνεται έκρηξη 600 m από το έδαφος και έτσι τα ραδιενεργά νέφος διασπείρεται σε μεγάλη απόσταση (εικ. 110). Η ραδιομόλυνση που έτσι δημιουργείται παραμένει για αρκετά χρόνια και επιβαρύνει τους κατοίκους μέσα από τη διαδικασία της αλυσίδας τροφών και της εισπνοής. Εξ άλλου οι πυρηνικές δοκιμές επίσης προσθέτουν ραδιομόλυνση.

Η βόμβα της Χιροσίμα είχε ισχύ 15.000 τόνους TNT, ενώ του Ναγκασάκι είχε ισχύ 25.000 τόνους TNT. Από την πρώτη έκρηξη (εικ. 111) τα θύματα ήταν 68.000 (την πρώτη μέρα) και 76.000 τραυματίες. Η δεύτερη βόμβα είχε 38.000

θήματα την πρώτη μέρα και 21.000 τραυματίες. Στους επιζήσαντες προκλήθηκαν σοβαρές βλάβες υγείας (βλ. κεφ. 4.5) όπως λευχαιμία, καταράκτης, καρκίνος του λάρυγγα, καρκίνος του στομάχου, κ.ά. ενώ στα παιδιά παρουσιάστηκαν επίσης διανοητικά προβλήματα.

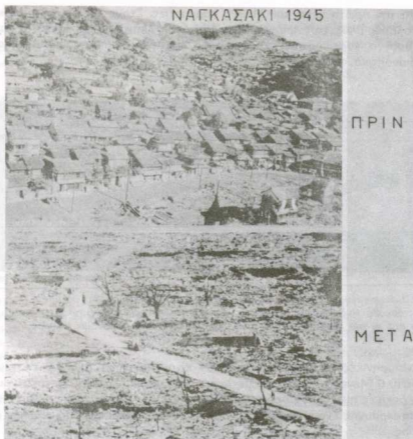


Εικ. 110: Χαρακτηριστικά ραδιενεργά νέφη επάνω από την επιφάνεια της θάλασσας μετά από πυρηνικές δοκιμές. Η διασπορά του νέφους υπόκειται σε μετεωρολογικές συνθήκες, ενώ η θερμοκρασία στο κέντρο μπορεί να φτάσει αρκετές δεκάδες χιλιάδων βαθμών Κελσίου.

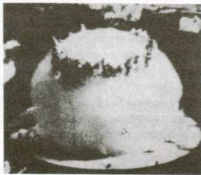
Οι πυρηνικές δοκιμές μέχρι το 1951 είχαν συνολική ισχύ 0,6 εκατομμύρια τόνους (0,6 Μεγατόνους), ενώ μέχρι το 1962 είχαν ισχύ 500 μεγατόνους. Όλες οι δοκιμές αυτές, που πρόσφατα βέβαια έχουν περιοριστεί εξ αιτίας της γενικής κατακραυγής έχουν προσθέσει στις επιπτώσεις (fallout) της φυσικής ραδιενέργειας.

Από το 1964 μέχρι το 1970 πραγματοποιήθηκαν από τις Η.Π.Α. 220 υπόγειες πυρηνικές δοκιμές στη έρημο της Νεβάδας (580 μέχρι σήμερα, Ιούνιος 1987) και σε βάθος 250-1.000 μέτρα). Σε μερικές περιπτώσεις έγινε μικρή διαφυγή ραδιενέργειας στον αέρα. Συνολικά όμως από το 1945 μέχρι το Δεκέμβριο του 1982 είχαν γίνει 1.375 δοκιμές από τις οποίες οι 1.200 έγιναν από τις Η.Π.Α. και τη Σοβιετική Ένωση, ενώ οι υπόλοιπες από τη Βρετανία, την Ινδία, τη Γαλλία και την Κίνα. Το μέγεθος κάθε δοκιμής περιορίζεται από ειδική συμφωνία σε 150.000 τόνους TNT, ενώ πρέπει να πραγματοποιείται υπόγεια. Οι πυρηνικές δοκιμές, ιδιαίτερα οι παλαιότερες έχουν επιβαρύνει τη ραδιομόλυνση της ατμόσφαιρας, ενώ δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις που επηρεάστηκε σημαντικά η ζωή των γύρω κατοίκων, με χαρακτηριστικά περιστατικά τα παρακάτω:

Σε πυρηνική δοκιμή στα **νησιά Marshall** της Πολυνησίας (1954) 82 άτομα έλαβαν δόσεις μέχρι 2 Sv και 150 άτομα έλαβαν περίπου 0,15 Sv, από εξωτερική έκθεση. Αρκετοί κάτοικοι επίσης έλαβαν με την τροφή ιώδιο-131 που συσσωρεύθηκε στο θυρεοειδή σε ποσότητα 1,5 Sv για τους ενήλικες και 4-14 Sv για τα παιδιά.



Εικ. 111: Ισοπέδωση κατοικημένης περιοχής μετά την έκρηξη της ατομικής βόμβας στη Χιροσίμα. Η υλική καταστροφή προκαλείται κυρίως από τη μεγάλη πίεση αερίων κατά την εκτόνωση, πράγμα που δεν συμβαίνει με βόμβες νετρονίων όπου τα κτίρια παραμένουν άθικτα αλλά οι επιπτώσεις στους ζωντανούς οργανισμούς είναι τεράστιες.

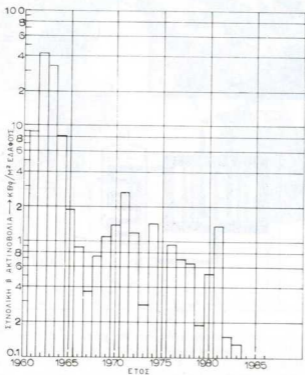


Εικ. 112: Πυρηνική έκρηξη στα νησιά Marshall του Νοτίου Ειρηνικού. Διακρίνονται καταδρομικά στην επιφάνεια της θάλασσας πολύ κοντά στο ραδιενεργό νέφος που έχει φτάσει σε ύψος περίπου 2.000 μέτρα.

Δέκα χρόνια αργότερα (1964) διαπιστώθηκαν σοβαρές βλάβες του θυρεοειδούς σε μεγάλο ποσοστό (80%) ατόμων μέχρι 10 ετών. Κατά την ίδια πυρηνική δοκιμή ακτινοβολήθηκε το πλήρωμα ενός Ιαπωνικού πλοιαρίου με δόσεις 2-6 Sv. Ένα άτομο του πληρώματος πέθανε, ενώ οι άλλοι επέζησαν.

Η βόμβα υδρογόνου ισχύος 10 εκατομμυρίων τόνων TNT (ενώ η βόμβα στη Hiroshima ήταν 15.000 τόνοι TNT) ρίχτηκε στο νησί Μπικίνι (εικ. 112) που είχε εκκενωθεί από τους κατοίκους του και βρισκόταν 100 μίλια μακριά από το κατοικούμενο νησί Ρόντζελαπ. Εξ' αιτίας όμως απρόβλεπτης αλλαγής των καιρικών συνθηκών το ραδιενεργό νέφος έπληξε το Ρόντζελαπ όπου 64 ιθαγείς εκτέθηκαν, σε δόσεις 200-500 rem.

Ιδιαίτερα αισθητή ήταν στη χώρα μας η επιβάρυνση από ραδιενέργεια κατά την περίοδο των έντονων πυρηνικών δοκιμών (1961-63), όπου η μέση μηνιαία τιμή ραδιενέργειας στην Αθήνα (από ακτινοβολία β) έφθασε στα 0,3 Bq/m³ με στιγμιαίες τιμές μέχρι και 1,5 Bq/m³. Στη λίμνη του Μαραθώνα διαπιστώθηκε ραδιενέργεια 3 Bq/κιλό νερού. Η ραδιενέργεια άρχισε να ελαττώνεται στη συνέχεια (βλ. εικ. 113), αλλά συνολικά στο έδαφος επικάθησαν 1.500 Bq/m² από στρόντιο (⁹⁰Sr) και 2.000 Bq/m² από κάισιο (¹³⁷Cs).



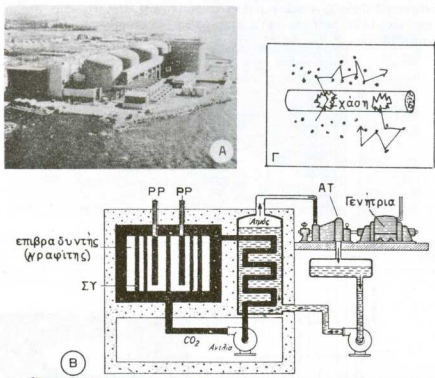
Εικ. 113: Ετήσια ραδιενεργή επίπτωση στο Ελληνικό έδαφος από τις πυρηνικές δοκιμές της δεκαετίας 1960-1970.

Το γάλα των αιγοπροβάτων ελεύθερης βοσκής παρουσίασε ραδιενεργό μόλυνση μέχρι 3 Βq/λίτρο για το στρόντιο και 10 Βq/λίτρο για το ιώδιο (μέση ετήσια ραδιενέργεια για το 1963).

5.5. Βιολογικές επιπτώσεις από πυρηνικά ατυχήματα

5.5.1. Τι ακολουθεί μετά από ένα πυρηνικό ατύχημα;

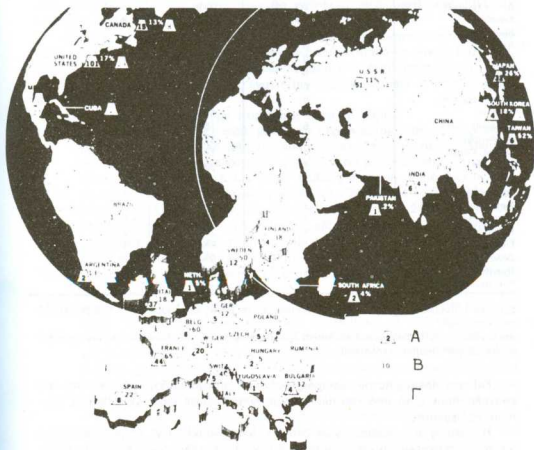
Η πυρηνική ενέργεια που υπάρχει από μόνη της στη φύση (π.χ. ραδιενεργά ορυκτά ή ακόμα, κοσμική ακτινοβολία ραδιενεργών μορίων) έχει συμπυκνωθεί από τον άνθρωπο και έχει αποθηκευθεί είτε με τη μορφή όπλων (ατομική βόμβα, βόμβα υδρογόνου, βόμβα πρωτονίων, κ.ά.) είτε με τη μορφή πυρηνικών εγκαταστάσεων (εικ. 114) ή ακόμη με τη μορφή πυρηνικών αντιδραστήρων (για πα-



Εικ. 114: Α: Πυρηνικό εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Β: Διάταξη του εργοστασίου με το σχάσιμο υλικό (ΣΥ), τις ρυθμιστικές ράβδους (ΡΡ), τη δεξαμενή νερού που βράζει και ενεργοποιεί μέσω στροστροβίλου (ΑΤ) τη γεννήτρια παραγωγής ρεύματος. Γ: Λεπτομέρεια των ράβδων ουρανίου-235 που παράγουν νετρόνια. Επιβράδυνση της δράσης τους μπορεί να γίνει με βαρύ νερό (D_2O) ή με γραφίτη.

ρασκευή ραδιοϊσοτόπων και για ερευνητικούς σκοπούς) αλλά και με τη μορφή ακτινοδιαγνωστικών και ακτινοθεραπευτικών συσκευών.

Αν και η σύγχρονη τεχνολογία που εφαρμόζεται στις παραπάνω μορφές εκμετάλλευσης της πυρηνικής ενέργειας είναι πολύ αναπτυγμένη, εν τούτοις δεν είναι σπάνιες οι περιπτώσεις που σε διεθνές επίπεδο έχουν συμβεί ατυχήματα με αποτέλεσμα πολύ σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων που έχουν ακτινοβοληθεί αλλά και στο μέλλον της ανθρωπότητας γενικότερα. Βέβαια η χρήση της πυρηνικής ενέργειας ακόμα και για ειρηνικούς σκοπούς (όπως είναι τα πυρηνικά εργοστάσια) έχει τύχει αυστηρής διεθνούς κριτικής ιδιαίτερα μετά από πρόσφατα ατυχήματα, εν τούτοις θα μπορούσε κανείς να προβλέψει ότι ο κόσμος θα συνεχίσει να ζει με το φάσμα της ενέργειας αυτής αφού εκτός από τα 383 πυρηνικά εργοστάσια που υπάρχουν σ' όλο τον κόσμο (εικ. 115, πίνακας



Εικ. 115: Κατανομή των πυρηνικών εργοστασίων σε χώρες της Γης: Παρουσιάζεται ο αριθμός λειτουργούντων εργοστασίων (Α), το ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας που καλύπτεται (Β) και ο προβλεπόμενος αριθμός μελλοντικών εργοστασίων (Γ) (από Life-Time).

ΧΧΙΧ), χρησιμοποιείται σε μεγάλη έκταση στην πυρηνική Ιατρική για διαγνωστικούς και θεραπευτικούς σκοπούς.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΧΧΙΧ. Πυρηνικοί αντιδραστήρες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας (1986)

Χώρα	Αριθμός	% συνόλου ηλεκτρικής ενέργειας	Υπό κατασκευή
Η.Π.Α.	101	17%	29
Σοβιετική Ένωση	51	11%	34
Γαλλία	44	65%	17
Αγγλία	37	18%	2
Ιαπωνία	32	26%	10
Δυτ. Γερμανία	20	31%	5
Καναδάς	15	13%	8
Σουηδία	12	50%	—
Βέλγιο	8	60%	—
Ισπανία	8	22%	2
Ινδία	6	4%	2
Ταϊβάν	6	52%	—
Ανατ. Γερμανία	5	12%	6
Ελβετία	5	40%	—
Πολωνία	5	15%	2
Βουλγαρία	4	32%	2
Νότιος Κορέα	4	18%	5
Φιλανδία	4	38%	—
Ιταλία	3	2%	2
Αργεντινή	2	13%	1
Νοτ. Αφρική	2	4%	—
Ουγγαρία	2	5%	2
Βραζιλία	1	2%	2
Γιουγκοσλαβία	1	5%	1
Ολλανδία	1	5%	2
Πακιστάν	1	0,2%	—
Ρουμανία	—	—	2

Συνολικά λειτουργούν 383 πυρηνικά εργοστάσια σε 26 χώρες του κόσμου ενώ 135 βρίσκονται υπό κατασκευή.

Υπολογίζεται πως τα ραδιενεργά κατάλοιπα των εργοστασίων αυτών θα δημιουργήσουν σοβαρό πρόβλημα αποθήκευσης μελλοντικά.

Για τους λόγους αυτούς θεωρούμε σκόπιμο να αναλύσουμε τα γεγονότα που επακολουθούν μετά από ένα πυρηνικό ατύχημα καθώς και τους πιθανούς τρόπους προφύλαξης.

Η έκλυση των ραδιενεργών ατόμων (ραδιονουκλιδίων) στην ατμόσφαιρα (μετά από πυρηνικό ατύχημα ή πυρηνική δοκιμή) αποτελεί τον μεγαλύτερο κίνδυνο για τις γύρω περιοχές ή χώρες, αφού π.χ. αν το ραδιενεργό νέφος ανέβει επάνω από το ύψος σχηματισμού των νεφών τότε η κάθοδος προς την επιφά-

νεια της Γης είναι και μεγαλύτερη σε ακτίνα γύρω από το επίκεντρο, αλλά και βραδύτερη (π.χ. μερικά χρόνια). Η παρουσία επίσης ισχυρών ανέμων και βροχής συμβάλουν στη μεταφορά και διασπορά του ραδιενεργού νέφους, ιδιαίτερα των υδατοδιαλυτών ραδιονουκλιδίων όπως π.χ. είναι το κάισιο -137.

5.5.2. ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ

Πόσο αφαλή είναι τα πυρηνικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας; Η έννοια της ασφάλειας σχετίζεται με την τεχνολογία που στην περίπτωση αυτή φαίνεται ότι η εφαρμογή της πυρηνικής ενέργειας προχώρησε με άλματα χωρίς παράλληλη τεχνολογική κάλυψη. Στο μέλλον ίσως υπάρξουν ασφαλή πυρηνικά εργοστάσια αλλά η χρήση τους θα πρέπει να περιοριστεί εκεί που δεν υπάρχουν άλλες μορφές ενέργειας.

Μια μελέτη που έγινε στα 1975 με βάση τα κατασκευαστικά στοιχεία των αντιδραστήρων έχει συμπεράνει ότι στατιστικά είναι πιθανό να γίνεται ένα πυρηνικό ατύχημα για κάθε 20.000 χρόνια λειτουργίας. Αυτό σημαίνει ότι όπου υπάρχουν π.χ. 100 αντιδραστήρες, ένα τέτοιο ατύχημα μπορεί να συμβαίνει κάθε 200 χρόνια.

Μερικά από τα σοβαρότερα ατυχήματα είναι τα εξής:

- 1952: Στο Chalk River του Καναδά, μετά από τυχαία μετακίνηση ράβδων ελέγχου προκλήθηκε μερική τήξη του ουρανίου στον πυρήνα του αντιδραστήρα. Ένα εκατομμύριο γαλόνια ραδιενεργό νερό συσσωρεύτηκε στο εσωτερικό του κτιρίου αλλά δεν έγινε σοβαρή διαφυγή ραδιενέργειας.
- 1957: Σε εργοστάσιο παραγωγής πλουτωνίου, στο Windscale κοντά στο Λίβερπουλ, έγινε διαρροή ραδιενέργειας στη γύρω περιοχή 200 τετρ. μιλίων. Απαγορεύτηκε η παραγωγή γάλακτος για ένα μήνα, ενώ υπολογίστηκε πως από το ατύχημα προκλήθηκαν 33 θάνατοι από καρκίνο. Η ισοδύναμη δόση που εκλύθηκε ήταν 1250 Sv.
- 1957: Ουράλια όρη. Από διαρροή σε εργοστάσιο εκκενώθηκαν και δεν ξαναχρησιμοποιήθηκαν 12 χωριά.
- 1961: Idaho - Η.Π.Α.: Από λάθος στην απομάκρυνση ράβδων ελέγχου έγινε έκρηξη σε πειραματικό αντιδραστήρα. Σκοτώθηκαν 3 τεχνικοί.
- 1979: Θρη Μάϊλ Άϊλαντ: Στο Harrisburg Πενσυλβανίας των Η.Π.Α. έπαθε βλάβη το σύστημα ψύξης σε έναν από τους δύο αντιδραστήρες. Έγινε μικρή διαρροή ραδιενέργειας 300 - 1.200 mrem/h στη γύρω περιοχή από όπου απομακρύνθηκαν προσωρινά 600.000 άτομα. Το πιο εκτεθειμένο άτομο έλαβε συνολική δόση μικρότερη από 100 mrem. (Η ισοδύναμη δόση που εκλύθηκε ήταν 80 Sv). Προκλήθηκε μόλυνση του νερού αλλά η περισσότερη ραδιενέργεια παρέμεινε εντός των πάχους 120 cm τοίχων του αντιδραστήρα. Τρία χρόνια αργότερα χρησιμοποιήθηκε κάμερα video για έλεγχο της ζημιάς, ενώ 7 χρόνια μετά το ατύχημα γίνεται η αποδεδειγμένη λυση του εσωτερικού των κτιρίων του αντιδραστήρα. Εκατομμύρια κιλά

νερό έχουν φιλτραριστεί για απομάκρυνση της ραδιενέργειας και μεγάλη ποσότητα στερεών ραδιενεργών υλικών έχει μεταφερθεί σε κατάλληλη περιοχή στο Richland της Πολιτείας Washington. Στο εσωτερικό των κτιρίων υπήρχε (Μάϊος του 1986) μεγάλη ποσότητα ραδιενεργού νερού, στο οποίο έχουν αναπτυχθεί βακτήρια. Σχεδιάζεται η χρησιμοποίηση αμφίβιων ρομποτ για τον καθαρισμό από ραδιενέργεια, ενώ υπολογίζεται ότι η όλη επιχείρηση καθαρισμού του Three mile Island, κόστους 2 δισ. δολλαρίων θα απαιτήσει πολλά χρόνια.

- 1981: Tsuruga, Ιαπωνία: Διαρροή ραδιενεργού νερού από δεξαμενή εργοστασίου πυρηνικής ενέργειας.
- 1986: Εργοστάσιο επεξεργασίας ουρανίου (Gore, Οκλαχόμα, ΗΠΑ). Μικρή έκρηξη προκάλεσε μικρή διαρροή ραδιενέργειας στο περιβάλλον.
- 1986: Τσερνόμπιλ, 130 Km βόρεια του Κιέβου, Ε.Σ.Σ.Δ. Ο ένας από τους 4 αντιδραστήρες, με ισχύ 1.000.000 βάττ παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εξεράγη: Ο αντιδραστήρας ήταν θερμικών νετρονίων, τύπου RBMK (ζεύοντας ύδατος) όπου το νερό βράζει καθώς απορροφά ενέργεια μέσα από τα διασπώμενα άτομα. Χρησιμοποιείται γραφίτης για επιβράδυνση ισχύος και άρχισε να λειτουργεί το 1984. Καύσιμο UO_2 σε δισκία. Εμπλουτίζεται με $u - 235$ κατά 3% και η διάρκεια ζωής του αντιδραστήρα (ονομαστική) είναι 30 χρόνια. Ροή ψυκτικού 37.500 τόνοι/ώρα και ρυθμός παραγωγής ατμού 5.468 τόνοι/ώρα.

Ιστορικό

25 Απριλίου 1986: Πραγματοποιήθηκε θεληματικά ελάττωση της ισχύος του ενός αντιδραστήρα για να γίνουν πειράματα. Παράλληλα, διακόπηκε το αυτόματο σύστημα ελέγχου ώστε να μπορέσει ο αντιδραστήρας να λειτουργήσει με μικρή ισχύ. Όταν όμως η ισχύς κατέβηκε σε χαμηλότερα, από τα επιθυμητά, επίπεδα τότε έγιναν προσπάθειες αύξησης της ισχύος με αφαίρεση 50 από τις 60 ράβδους ελέγχου των πυρηνικών αντιδράσεων. Επί πλέον, το προσωπικό που εκτελούσε τα πειράματα έθεσε εκτός λειτουργίας ένα ακόμα σύστημα ασφάλειας.

26 Απριλίου 1986, ώρα 1:20 π.μ.: Όταν η ισχύς του αντιδραστήρα έφτασε τα επιθυμητά επίπεδα, άρχισε το πείραμα. Ξαφνικά όμως παρουσιάστηκε υπερθέρμανση του αντιδραστήρα που επειδή τα συστήματα ελέγχου και ψύξης είχαν αποδυσμευτεί δεν έγινε αυτόματα καταστολή (όπως είχε σχεδιαστεί κατά την κατασκευή του αντιδραστήρα). Μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα, και εξ αιτίας υπερβολικής αύξησης της θερμοκρασίας έγιναν δύο εκρήξεις που τόνωσαν στον αέρα την οροφή του αντιδραστήρα και προκάλεσαν 30 εστίες φωτιάς. Έτσι καταστράφηκε ο πυρήνας του αντιδραστήρα, ενώ οι ράβδοι γραφίτη γύρω του άρχισαν να καίγονται σε θερμοκρασία 2800°F (~1540 °C). Η φωτιά προκάλεσε εκτίναξη ραδιονουκλιδίων στην ατμόσφαιρα που λόγω ξηρότητας έφτασαν σε ύψος 1200 μέτρα και έτσι έγινε διασπορά τους σε όλη σχεδόν την Ευρώπη (εικ. 116). Παράλληλα γίνονταν υπεράνθρωπες προσπάθειες για πυρόσβεση, με εναπόθεση 5.000 τόνων βορίου, μολύβδου και άλλων υλικών. Η φωτιά σβήστηκε 12 μέρες αργότερα. Σύμφωνα με εκτιμήσεις Σοβιετικών επιστημόνων, το 3% των 180 τόνων διοξειδίου του ουρανίου (UO_2) που βρισκόταν στον πυρήνα του αντιδραστήρα εκλύθηκε στην ατμόσφαιρα (~300.000.000 κιουρί).

Μια έκταση 300 τετρ. μιλίων εκκενώθηκε γύρω από τον αντιδραστήρα με άμεση μετακίνηση περίπου 130.000 ανθρώπων.

Συμπερασματικά, έχει αποδειχθεί ότι το ατύχημα αυτό σφειλόταν σε πολλαπλά ανθρώπινα λάθη - επεμβάσεις στην απόλυτη ασφαλή και αυτοματοποιημένη λειτουργία του αντιδραστήρα.

Σάββατο 26 Απριλίου 1986



Δευτέρα 28 Απριλίου 1986



Τετάρτη 30 Απριλίου 1986



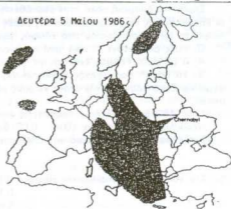
Παρασκευή 2 Μαΐου 1986



Σάββατο 3 Μαΐου 1986



Δευτέρα 5 Μαΐου 1986



Εικ. 116: Πορεία του ραδιενεργού νέφους από τις 26-4-86 μέχρι τις 5-5-86, μετά την έκρηξη στο πυρηνικό εργοστάσιο του Τσερνοβίλ (από έκθεση NRPB).

Τι περιέχει το ραδιενεργό νέφος;

α) **Καίσιο** με μορφή οξειδίων ή υδροξειδίων με υδατοδιαλυτές ιδιότητες: έτσι όπου το ραδιενεργό νέφος συνάντησε νέφος βροχής το παρέσυρε στο έδαφος με τις σταγόνες του νερού. Η ποσότητα καϊσίου που ελευθερώθηκε υπολογίζεται σε 500 φορές περισσότερη από ότι εκλύθηκε από τη βόμβα της Χιροσίμα.

β) **Το ιώδιο -131** ελευθερώθηκε από την περιοχή του ατυχήματος σε αέρια μορφή της οποίας η υδατοδιαλυτότητα σε σταγόνες βροχής είναι αντιστρεπτή (δηλ. μπορεί και να μεταπηδήσει ιώδιο -131 από τη σταγόνα προς το περιβάλλον αν η συγκέντρωσή του εκεί είναι μεγαλύτερη).

γ) **Τελοούριο, Βάριο, Λανθάνιο, κ.ά.** (βλ. Πίνακα XXX)

ΠΙΝΑΚΑΣ XXX. Ραδιονουκλίδια του νέφους

Ραδιονουκλίδιο	Χρόνος υποδιπλασιασμού	Ενέργεια γ ακτινοβολίας (Κev)
Rh-106	29,8 δευτερόλεπτα	511,9-621,8
I-132	82,6 λεπτά	- 667,7
La-140	40,27 ώρες	487,0-328,8-1596,5-815,8
Te-132	78,2 ώρες	228,2
I-131	8,04 μέρες	364,5 κ.ά.
Ba-140	12,75 μέρες	537,3
Ce-141	32,5 μέρες	145,4
Nb-95	35,15 μέρες	765,8
Ru-103	39,35 μέρες	497,1-610,3
Zr-95	63,98 μέρες	756,7-724,2
Ce-144	284,9 μέρες	133,5
Cs-134	2,062 χρόνια	604,7-795,8-1167,9 κ.ά.
Cs-137	30 χρόνια	661,6

Προσβολή του Ελλαδικού χώρου από το ραδιενεργό νέφος

Σημαντικά δυσμενή ρόλο στην εναπόθεση ραδιενεργού μόλυνσης στον Ελλαδικό χώρο έπαιξαν οι βροχοπτώσεις που σημειώθηκαν τις μέρες που ακολούθησαν την άφιξη του νέφους, με αποτέλεσμα τη διείδυση καϊσίου στο έδαφος των αντιστοιχών περιοχών.

Οι τιμές ραδιενέργειας πριν από το πυρηνικό ατύχημα ήταν οι εξής, στον Ελλαδικό χώρο:

4 - 8 μR/ώρα: Ρυθμός έκθεσης σε ύψος 1 m από το έδαφος

5 - 15 Bq/m³: Ραδιενεργός συγκέντρωση σε ανοικτούς χώρους. Η τιμή αυτή μπορεί να γίνει μέχρι και δεκαπλάσια σε κλειστούς χώρους λόγω ραδιενεργού ραδόνιου που υπάρχει στα δομικά υλικά.

100 - 250 Bq/m³: Ετήσια ραδιενεργή επίπτωση (συνολική β - ακτινοβολία).

Νερό λίμνης Μαραθώνα: 0,04 - 0,07 Bq/λίτρο (συνολική β - ακτινοβολία).

Στο έδαφος και στην άμμο της θάλασσας: 10 - 50 Bq/κιλό για ράδιο ²²⁶Ra

10 - 30 Bq/κιλό για θόριο ²³²Th και

100 - 500 Bq/κιλό για κάλιο ⁴⁰K

Στο γάλα των αιγοπροβάτων είχαμε 0,1 Bq/λίτρο για καίσιο ¹³⁷Cs

0,1 Bq/λίτρο για στρόντιο ⁹⁰Sr και

0,0 Bq/λίτρο για ιώδιο ¹³¹I.

Τέλος η συγκέντρωση καϊσίου στα ψάρια ήταν περίπου 1 Bq/κιλό.

Η πρώτη ανίχνευση αυξημένης ραδιενέργειας στον αέρα έγινε τις πρωινές ώρες της 2.5.86 στη Θεσσαλονίκη, ενώ στην Αθήνα εντοπίστηκε αύξηση στις 2 μ.μ. (η γρήγορη αυτή κάθοδος του

νέφους εξηγείται από την ύπαρξη ισχυρών βόρειων ανέμων). Η μέγιστη τιμή έκθεσης στην Αθήνα ήταν 16,5 $\mu\text{R}/\text{ώρα}$ στις 3.5.86 (έναντι τιμής 4 $\mu\text{R}/\text{ώρα}$ που ήταν δύο μέρες πριν).

Σε δείγματα αέρα εντοπίστηκαν στις 2.5.86 (11 μ .μ.) (Πίνακας XXXI) I - 131, Te - 132, I - 132, Cs - 137, Cs - 134, Ba - 140, La - 140, Ru - 103 καθώς και άλλα ραδιονουκλίδια αλλά σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις (Ru - 106, Ce - 141, Ce - 144, ZN - 95/Nb - 95, Te - 127m, Cs - 136, I - 136, Nd - 147, Eu - 156, Wo - 99, Mo - 99, Ag - 110m, Sb - 125, Sb - 127).

ΠΙΝΑΚΑΣ XXXI. Οι τιμές των κυριότερων ραδιονουκλιδίων στον αέρα, για τις 3-5-86.

Νουκλίδιο	Ραδιενέργεια στον αέρα (Bq/m ³)/Ραδιενεργή επίπτωση στο έδαφος (X 1.000 Bq/m ²)			
	Αθήνα	Θεσ/νίκη	Πτολεμαίδα	Αλιβέρι
Te-132	34/6-10	20/30	27/(30-40)	19/(5-10)
Ba-140	12/2,5	6,5/17	8,5/24	8/5
Ru-103	11/9	7,2/27	11/47	6,2/2,5
I-131	11/17	5-10/50	12/(50-70)	8,5/(10-15)
Cs-137	4/2,5	4/12	3,7/19	3,1
Ru-106	2,5/2	1,8/6	2,7/12	1,4/0,7
Cs-134	2/1,2	1,9/6	1,6/9	1,4/0,5

* Οι παρενθέσεις δείχνουν εκτιμήσεις

Από τα τρόφιμα κύρια επιβάρυνση (λόγω τροφικής αλυσίδας) παρουσίασε το γάλα της αγελάδας στις 5 - 10 Μαΐου: 700 Bq/λίτρο I - 131 και 40 - 100 Bq/λίτρο Cs - 137 + Cs - 134.

Για το γάλα αιγοπροβάτων ελεύθερης βοσκής οι τιμές ήταν αντίστοιχα 3.000 - 9.000 Bq/λίτρο I - 131 και 100 - 200 Bq/λίτρο καίσιο 137 και 134.

Αντίστοιχες τιμές ραδιομόλυνσης παρουσίασε και το τυρί που παρασκευάστηκε μετά τις 3 Μαΐου 1986 με σταδιακή μείωση της ραδιενέργειας και λόγω υποδιπλασιασμού του I - 131, αλλά και λόγω μείωσης της ραδιενέργειας στην τροφή των ζώων.

Ραδιενέργεια έδειξαν, όπως αναμενόταν άλλωστε και πολλά άλλα καταναλωτικά προϊόντα, όπως κρέας (-100 Bq/κιλό, για I - 131 και για καίσιο), λαχανικά (-2.000 Bq/κιλό για I - 131 και 30 Bq/κιλό για καίσιο), φρούτα (2.000 Bq/κιλό για I - 131 και για καίσιο), κ.λπ. Ανάλογα με την κάθε περιοχή της χώρας υπήρχε αυξομείωση των παραπάνω τιμών, ενώ θα πρέπει να τονιστεί ότι συνολικά η συγκέντρωση ραδιονουκλιδίων στα διάφορα προϊόντα ήταν πολύ διαφορετική. Π.χ. ήταν 70% I - 131 και 30% καίσιο για το γάλα αγελάδας 80% και 20% καίσιο για το γάλα αιγοπροβάτων, 45% I - 131 και 50% καίσιο για το κρέας, 40% I - 131, 20% καίσιο, 40% άλλα ραδιονουκλίδια (Ba - 140, Te - 132, Ru - 103 κ.λπ.), για τα λαχανικά και τα κηπευτικά, ενώ για τα φρούτα οι κατανομές ήταν: 20% I - 131, 35% καίσιο, 25% Ru - 103, 10% Ba - 140, 10% Te - 132.

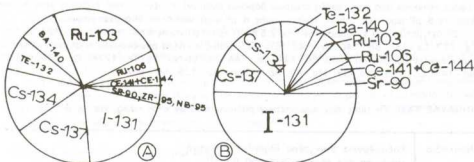
Η σχέση ανάμεσα στις συγκεντρώσεις ραδιονουκλιδίων και τις αντίστοιχες ενεργές ισοδύναμες δόσεις* (Ε.Ι.Δ.) φαίνεται στην εικ. 117.

Συνολικά έχει μετρηθεί πως στο έδαφος συσσωρεύτηκαν (Bq/m²):

Ιώδιο - 131: Αθήνα 17.000, Θεσ/νίκη 50.000, Πτολεμαίδα 50 - 70.000, Αλιβέρι 10 - 15.000, Μεγαλόπολη 40.000.

Καίσιο 135 + 134: 3.700, 18.000, 28.000, 1.500 και 18.000 αντίστοιχα.

Βλέπουμε ότι η ραδιενεργή επίπτωση λόγω επικάλυψης των ραδιονουκλιδίων στο έδαφος κυμαίνεται και δεν ακολουθεί την αντίστοιχη συγκέντρωση στον αέρα. Οι μέγιστες τιμές επίπτωσης I - 131, Cs - 137, Cs - 134 ήταν περίπου πέντε φορές μεγαλύτερες από εκείνες για τις οποίες η Ν-



Εικ. 117: Α: Κατανομή συγκεντρώσεων ραδιονουκλιδίων (% σε Bequerel) και Β: κατανομή ενεργών ισοδυνάμων δόσεων (% σε mrem).

RPB (Διεθνής Επιτροπή Ραδιοπροστασίας) συνιστά προσωρινό περιορισμό κατανάλωσης νωπού γάλακτος σε νήπια ενός έτους και δύο ετών.

Η μείωση της ραδιενέργειας στον αέρα ήταν εκθετική κατά το διάστημα 4.5.86 μέχρι 15.5.86, ενώ έφτασε σχεδόν τα πριν το ατύχημα επίπεδα (3 - 4 Bq/m³) κατά το τέλος Ιουνίου 1986.

Σύμφωνα με μετρήσεις του Κέντρου Πυρηνικών Ερευνών «Δημόκριτος» μεγαλύτερη επιβάρυνση του εδάφους, λόγω βροχοπτώσεων εμφανίζει η περιοχή των νομών Τρικάλων - Γρεβενών - Κοζάνης, ενώ μικρότερη επιβάρυνση έχουν τα εδάφη της Δυτικής Ελλάδας, της Νότιας Στερεάς και της Πελοποννήσου. Η μέγιστη επιβάρυνση που έχει μετρηθεί είναι 1.000 - 2.000 Bq/κιλό εδάφους για Cs - 137 μαζί με Cs - 134 και περίπου 500 Bq/κιλό εδάφους για Ru - 106 και Ce - 144.

Οι τιμές ραδιενέργειας στο νερό ήταν ως εξής για I - 131 (και για Cs - 137 + Cs - 134) σε Bq/λίτρο.

Νερό βροχής: 92 (4) στις 5.5.86 μέχρι 11.5.86 και 0,8 (0,8) στις 1.6.86.

Νερό λίμνης (εμφάνεια): 25 (M.A.) και M.A. (M.A.) αντίστοιχα.

Πόσιμο νερό: 11 (1) και 1,5 (M.A.) αντίστοιχα

(η συνολική τιμή στις αρχές του 1986 ήταν 0,04 - 0,08 Bq/λίτρο αντίστοιχα)

M.A.: Μη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια

(Επιτρεπόμενες τιμές: 1,1 Bq/κιλό για σωματίδια -β και 0,1 Bq/λίτρο για σωματίδια -α).

Εκτίμηση μέσης δόσης Ελληνικού πληθυσμού

Η απορρόφηση ραδιενέργειας του πληθυσμού από το ατύχημα στο Τσερνομπίλ, έγινε με τους εξής τρόπους (βλ. πίνακα XXXII).

α) **Εξωτερική ακτινοβολία** από τα ραδιονουκλίδια του ραδιενεργού νέφους (ιώδιο, κάισιο, στρόντιο, τελλούριο, βάριο, κ.α.) δηλ. από άμεση επαφή με το δέρμα και τα ρούχα, καθώς και από ακτινοβολία του εδάφους μετά από βροχόπτωση. Η ραδιενέργεια αυτή προέρχεται κυρίως από ακτινοβολία γ και υπολογίζεται ότι πρόσθεσε συνολικά επιβάρυνση 24,6 mrem σε κάθε άνθρωπο επί 24ώρου έκθεσης. Στην πραγματικότητα η απορροφηθείσα ισοδύναμη δόση για κάθε άνθρωπο εκτιμάται σε μέση τιμή 2,4 mrem (3 ώρες στο ύπαιθρο/ημέρα).

β) **Εσωτερική ακτινοβολία λόγω εισπνοής:** Αν δεχθούμε ότι η ημερήσια πρόσληψη (και αποβολή) αέρα είναι περίπου 22 κυβικά μέτρα για τους ενήλικες και 15m³ για τα παιδιά, τότε για την περίοδο 2.5.86 μέχρι 31.5.86 υπολογίζεται (με συντελεστές μετατροπής) πως η συνολική επιβάρυνση είναι 5 mrem και 7 mrem αντίστοιχα.

γ) **Εσωτερική ακτινοβολία από πρόσληψη νερού:** Από μετρήσεις που έγιναν σε δείγματα νερού της ΕΥΔΑΠ έχει προκύψει ότι για το διάστημα 3.5.86 μέχρι 30.6.86 η ραδιενέργεια που έχει

ΠΙΝΑΚΑΣ XXXII. Ενεργός ισοδύναμη δόση από 1-131 στα τρόφιμα (σε mrem)

	Ενήλικες		Παιδιά 10 ετών		Παιδιά 1 έτους	
	Με	Χωρίς	Με	Χωρίς	Με	Χωρίς
1η εβδομάδα	4,3		10,1		8,9	
2η »	2,5		5,3		5,3	
3η »	1,5		2,9		2,7	
4η »	0,6		1,5		1,2	
5η »	0,35		0,77		0,75	
6η »	0,32		0,62		0,75	
7η »	0,26		0,44		0,61	
8η »	0,27		0,51		0,61	
Ενεργός δόση από Cs-137-+Cs-134 στα τρόφιμα (σε mrem)						
Μάιος 1986	4,14		2,83		1,44	
Ιούνιος 1986	2,06		1,62		0,83	
Ιουλ.-Αύγ. 1986	4,3		3,82		1,3	
Σεπτ. '86-Απρ. '87	27,77		14,22		2,53	
Γενικό σύνολο	48,37		44,63		35,92	

Ληφθεί από κάθε άτομο δεν ξεπερνά τα 250 Bq για ενήλικες και τα 150 Bq για παιδιά (κατανάλωση νερού 1,6 λίτρα/ημέρα και 0,9 λίτρα/ημέρα αντίστοιχα). Η ραδιενέργεια αυτή συνδυαζόμενη με συντελεστή δόσης/πρόσληψης = 2×10^{-3} mrem/Bq που ισχύει για καίσιο 134 για ενήλικες ($3,6 \times 10^{-3}$ mrem/Bq για 1-131 για παιδιά 10 ετών), δίνει δόσεις 0,5 mrem και για τις δύο περιπτώσεις. Αυτή είναι και η συνολική αναμενόμενη δόση επιβάρυνσης κάθε ατόμου *συνολικά* από την κατανάλωση νερού μετά από το ατύχημα του Τσερνόμπιλ.

δ) **Εσωτερική ακτινοβόληση από τροφές:** Είναι προφανές ότι η εκτίμηση της δόσης που απορροφήθηκε από κάθε άτομο ποικίλλει ανάλογα με τη διατροφή του γι' αυτό και οι τιμές που δίνονται είναι καθαρά θεωρητικές και με βάση 1) τη μέση κατανάλωση τροφών από τους Έλληνες, 2) τις μέσες μετρήσεις ραδιενέργειας στις διάφορες τροφές. Οι υπολογισμοί σύμφωνα με εκτιμήσεις από το Κ.Π.Ε. «Δημόκριτος» δίνουν τα εξής ως προς τις δόσεις που απορροφήθηκαν (ή θα απορροφηθούν) από τις τροφές μετά από τις κατάλληλες προφυλάξεις (Πίνακας XXXIII).

ΠΙΝΑΚΑΣ XXXIII. Συνολική εκτίμηση των δόσεων (οι τιμές είναι σε mrem). («Με μέτρα», σημαίνει αποφυγή ωρισμένων τροφών).

Είδος πρόσληψης	Ενήλικες		Παιδιά 10 ετών		Παιδιά 1 έτους	
	Με μέτρα	Χωρίς μέτρα	Με μέτρα	Χωρίς μέτρα	Με μέτρα	Χωρίς μέτρα
Εξωτ. ακτινοβολία	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Εισπνοή	4,6	4,6	6,1	6,1	6,42	6,42
Πόσιμο νερό	1,0	1,0	1,0	1,0	-	-
Τρόφιμα 1-131	5,55	10,07	17,02	22,19	12,16	20,8
Τρόφιμα Cs	38,20	43,54	22,17	26,44	6,10	6,10
Σύνολο διατροφής	43,75	53,61	39,19	48,63	18,26	26,9
Συνολική δόση mrem	51,75	61,61	48,69	58,13	27,08	35,72

Επιπτώσεις από το ατύχημα στο Τσερνόμνιλ

Από την ισχυρή έκκριση σημειώθηκαν 2 θάνατοι, ενώ από εγκαύματα και τη δέσμευση ραδιενέργειας 29 ακόμα άτομα πέθαναν στις επόμενες εβδομάδες. Οι μακροπρόθεσμες όμως επιπτώσεις της ραδιενέργειας στον άνθρωπο είναι εξ' ίσου επιβλαβείς αφού (ανάλογα με τη δόση και την τοπολογία της επίδρασης) είναι δυνατόν να προκληθούν διάφοροι καρκίνοι (λευχαιμία, καρκίνος οστών, στήθους, πνευμόνων, πεπτικού συστήματος και θυροειδούς) καθώς και γονιδιακές αλλαγές που προκαλούν στους απογόνους: αυτοσωματικές μεταλλάξεις (πολυδακτυλία, απελής σαστεόγνεση, κ.λπ.), φυλοσύνδετες γονιδιακές μεταλλαγές (αιμολυτική αναιμία, G6PD, αιμοροφιλία Α, κ.λπ.), ανευπλοειδείς μεταλλαγές (σύνδρομο Down, σύνδρομο Turner, κ.ά.) χρωμοσωμικές αλλοιώσεις (σύνδρομο De Gro uchyn, κ.λπ.). Με βάση τις απορροφηθείσες δόσεις από τον πληθυσμό και την εξίσωση πιθανοτήτων: $r = (ad + bd^2)T^{k-1}$, όπου r είναι η κεντρική προσδιορίσιμη τιμή της πιθανότητας ενός απόγονου της K γενιάς να παρουσιάσει μια γενετική αλλοίωση από απορροφηθείσα δόση d , που έλαβε στα γεννητικά κύτταρα πρόγονός του που εκτέθηκε σε ραδιενεργό ακτινοβολία, a και b είναι παράμετροι δόσης και T είναι ο ρυθμός μεταβίβασης σε K γενιές. Η τιμή r που προσδιορίστηκε για κάθε είδος γενετικής αλλοίωσης (βλ. παραπάνω), πολλαπλασιάστηκε με τον συντελεστή 0,42 που είναι ο «μέσος αριθμός αναμενομένων τέκνων» από κάθε άτομο πρότυπης γενεάς (30 ετών σε διάρκεια). Σαν τιμές *ισοδύναμης δόσης d* χρησιμοποιήθηκαν αυτές που αναφέρονται σε προηγούμενα κεφάλαια. Οι υπολογισμοί δείχνουν ότι από την ραδιομόλυνση του Τσερνόμνιλ αναμένονται για τον Ελληνικό πληθυσμό 204 περιπτώσεις καρκίνων σε προσθήκη των 600.000 που θα συμβούν στα επόμενα 30 χρόνια. Επίσης οι 225.000 γεννήσεις παιδιών με γενετικές ανωμαλίες θα αυξηθούν κατά 58 στα επόμενα 30 χρόνια για τον ίδιο λόγο. Στις περιοχές γύρω από τον αντιδραστήρα εκτιμάται ότι 5.000 άνθρωποι έχουν δεχθεί άμεση επίδραση δόσεων ακτινοβολίας, 1.500 από μολυσμένο γάλα και 38.000 από άλλες μολυσμένες τροφές).

(Τα παραπάνω στοιχεία προέρχονται από έκθεση εμπειρογνομώνων του Κέντρου Πυρηνικών Ερευνών «Δημόκριτος»).

Μεταφορά και επιπτώσεις του ραδιενεργού νέφους του Τσερνόμνιλ σε άλλες χώρες.

Η πρώτη ανίχνευση της διαρροής ραδιενέργειας, εκτός Σοβιετικής Ένωσης, έγινε στη Σουηδία το πρωί της 28ης Απριλίου 1986, πράγμα που εξηγείται αφού το ραδιενεργό νέφος κινήθηκε αρχικά προς τα βορειοδυτικά καλύπτοντας διαδοχικά τη Σουηδία, Δανία, Βόρεια Γερμανία, Ολλανδία επιστρέφοντας στη συνέχεια προς τα Νότια - νοτιοανατολικά πάνω από την Ιταλία, Γιουγκοσλαβία, Αυστρία, Βουλγαρία, Ελλάδα. Οι μετρήσεις που έγιναν έδειξαν ότι οι χώρες (της ΕΟΚ) που μολύνθηκαν περισσότερο από το ραδιενεργό νέφος είναι η Δυτ. Γερμανία, η Βόρεια Ιταλία, η ανατολική Γαλλία, ενώ ακολουθούν η Ελλάδα, η Ολλανδία, η Αγγλία, η Δανία, το Λουξεμβούργο και τα Βέλγιο. Ενδεικτικές μέσες τιμές ραδιομόλυνσης εδάφους ήταν οι εξής (για ιώδιο -131 σε Bq/m^2): Γερμανία 10.000 - 120.000, Γαλλία 1.000, Ολλανδία 1.000 - 10.000, Αγγλία 9.000, ενώ οι τοπικές μέγιστες τιμές βρέθηκαν (σε Bq/m^2) για τη Γερμανία 160.000, Ολλανδία 40.000, Αγγλία 30.000 και Δανία 28.000. Η μέση ραδιενεργός επίπτωση του εδάφους από $Cs - 137 + Cs - 134$ είναι: Αυστρία 22.000 Bq/m^2 , Νορβηγία 11.000 Bq/m^2 , Φιλανδία, Σουηδία, Ελβετία, Δυτ. Γερμανία 8.000 Bq/m^2 , Ιταλία, Ελλάδα, Λουξεμβούργο 6.000 Bq/m^2 , Ολλανδία, Γαλλία, Δανία, Βέλγιο, Ιρλανδία, Αγγλία 1.000 Bq/m^2 , ενώ οι τοπικές μέγιστες τιμές (σε Bq/m^2) έφθασαν και μέχρι 190.000 (Σουηδία), 100.000 (Νορβηγία), 60.000 (Αυστρία, Ελβετία, Δυτ. Γερμανία), 40.000 (Αγγλία), 30.000 (Ελλάδα, Φινλανδία). Το στρόντιο -90 ανιχνεύθηκε σε πολύ χαμηλές ποσότητες (~0,5 - 3 Bq -λίτρο) για όλες τις χώρες.

Η μέση ραδιομόλυνση θυροειδούς από ιώδιο -131 για τα παιδιά και τους ενήλικες(ι) υπολογίστηκε (σε mg/m^2), για τα Βέλγιο 1.000/29, Δανία 930/45, Ανατ. Γαλλία 2.300/60, Δυτ. Γερμανία 2.000/100, Ελλάδα 650/50, Ιρλανδία 610/37, Ιταλία 400/80, Λουξεμβούργο 920/37, Ολλανδία 550/37, Πορτογαλία 5/0,07, Ισπανία 6 - 200/0,1 - 3, Αγγλία 410 - 1.100/13 - 17.

Ο ρυθμός εξωτερικής έκθεσης σε ολικά ραδιονουκλίδια ήταν, για τις 14.586: Στην Ελλάδα 19

μR/ώρα, Βουλγαρία 70 μR/ώρα, Ολλανδία 19 μR/ώρα, Ουγγαρία 43 μR/ώρα, Γιουγκοσλαβία 160 μR/ώρα, Αυστρία 88 μR/ώρα, Νορβηγία 22 μR/ώρα, Φινλανδία 34 μR/ώρα.

Με βάση όλα τα παραπάνω δεδομένα έχει υπολογιστεί πως η συνολική επιβάρυνση σ' όλες τις χώρες της ΕΟΚ θα είναι 80.000 man - Sv (η συνολική επιβάρυνση για τον ίδιο πληθυσμό, από φυσική ακτινοβολία είναι 500.000 man - Sv), ενώ οι ισοδύναμες δόσεις για κάθε άτομο στις διάφορες χώρες εκτιμάται ότι είναι (σε mrem), για το Βέλγιο 4 - 40, Δανία 5 - 40, Γαλλία 2 - 100, Γερμανία 5 - 190, Ελλάδα 30 - 130, Ιρλανδία 10 - 50, Ιταλία 12 - 110, Λουξεμβούργο 5 - 40, Ολλανδία 6 - 38, Αγγλία 3 - 84.

Από τις δόσεις αυτές και με θεωρητική επεξεργασία υπολογίζεται πως σε όλες τις χώρες της ΕΟΚ θα εμφανιστούν εξ' αίτιας του ατυχήματος στο Τσερνόμπιλ 1.000 περιπτώσεις θανατηφόρων καρκίνων στα επόμενα πενήντα χρόνια, επί πλέον των 30.000.000 περιπτώσεων που αναμένονται (με βάση το σημερινό ρυθμό) να παρουσιαστούν από άλλες αιτίες.

Τέλος, είναι ενδιαφέρουσα η παρατήρηση της άνησης αντιμετώπισης της ραδιομόλυνσης στις διάφορες χώρες τόσο από άποψη ενημέρωσης του πληθυσμού (για λήψη μέτρων) όσο και από άποψη καθορισμού επιτρεπτών ορίων ραδιενέργειας στις τροφές: π.χ. για το ιώδιο -131 στο γάλα, η Γαλλία είχε θέσει όριο την τιμή 3.700 Bq/λίτρο, η Αγγλία 2.000 Bq/λίτρο, το Βέλγιο 500 Bq/λίτρο, ενώ για το ιώδιο -131 στα λαχανικά το όριο δόσης στη Γαλλία ήταν 2.000 Bq/κιλό, Ολλανδία 1.300 Bq/κιλό, Δυτ. Γερμανία 250 Bq/κιλό. Οι διαφορές αυτές βέβαια δεν οφείλονται σε διαφορές ραδιοευσαισθησίας των καταϊκων αλλά στις κοινωνικό - οικονομικές διαστάσεις που έχει το πρόβλημα των εφαρμογών της πυρηνικής ενέργειας (βλ. επίσης κεφ. 5.6.).

Τα παραπάνω στοιχεία προέρχονται κυρίως από έκθεση Επιτροπής Εμπειρογνομημένων της ΕΟΚ, Morrey, Brown, Williams, Crick, Simmonds, Hill, 1987).

5.6. ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ ΑΠΟ ΙΟΝΙΖΟΥΣΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΖΩΗΣ

Όπως είδαμε, η μέση δόση ακτινοβολίας που δέχεται ένας άνθρωπος από φυσικές πηγές είναι 125 mrem το χρόνο, χωρίς να λάβουμε υπ' όψη μας πως σε πολλές περιοχές της Γης, η τιμή αυτή γίνεται μέχρι και 20πλάσια. Έτσι, η δόση που δέχεται κανείς σε απλές ακτινογραφίες (36mrem το χρόνο κατά μέσο όρο) θα μπορούσε να θεωρηθεί αμελητέα. Το ίδιο αμελητέες θα μπορούσαν να θεωρηθούν και οι δόσεις από πυρηνικούς αντιδραστήρες ή πυρηνικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (1-2 mrem) εφ' όσον βέβαια έχουν παρθεί όλα τα απαραίτητα μέτρα ασφαλείας. Εδώ θα πρέπει να επισημανθεί ότι αν και από Βιολογικής άποψης μόνο η *μηδενική δόση* είναι ασφαλής, εντούτοις δεν θα πρέπει να ξεχνάμε ότι όλα τα όντα στη Γη εξελίχθηκαν και ζουν κάτω από την επίδραση *υποχρεωτικά* κάποιας δόσης ιονίζουσας ακτινοβολίας (που σε πολλές περιοχές του κόσμου είναι συνεχώς 20πλάσια από εκείνη που δέχονται οι κάτοικοι άλλων περιοχών) που θεωρείται «ασφαλής». (Πως αλλιώς θα μπορούσε να θεωρηθεί μια δόση που υπήρχε πάντοτε). Ακόμα, πρέπει να σημειώσουμε ότι τα Βιολογικά αποτελέσματα από χαμηλές δόσεις έχουν στατιστική ερμηνεία δηλ. «πόσο ποσοστό του πληθυσμού που εκτέθηκε έχει πιθανότητα να προσβληθεί». Αν όμως θεωρήσουμε τους ανθρώπους (τον κάθε άνθρωπο) σαν ξεχωριστές οντότητες (όπως θάπρεπε) και όχι σαν στατιστικές μονάδες, τότε οποιοδήποτε, έστω και μικρό ποσοστό επιβάρυνσης είναι υπολογίσιμο. Οποιοδήποτε όμως υπάρχουν περιπτώσεις ακτινοδιάγνωσης, στις οποίες απαιτείται υψηλή δόση ακτινοβολίας (π.χ.

μαστογραφία, αξονική τομογραφία, ακτινοσκόπηση πεπτικού συστήματος κ.ά.). Εδώ θα πρέπει να λαμβάνονται διάφοροι παράγοντες υπ' όψη πριν την υποβολή στην εξέταση, όπως η αναγκαιότητα, η ηλικία και η ύπρηξη εγκυμοσύνης.

Όσον αφορά στην εν γένει επικινδυνότητα των ιονιζουσών ακτινοβολιών για το πλατύ κοινό, ο συγκριτικός πίνακας που ακολουθεί (Πίνακας XXXIV) δείχνει ολοφάνερα πως η σωστή χρησιμοποίησή τους προκαλεί πολύ λιγότερους θανάτους από ότι άλλες αιτίες. Έπειτα ας μη ξεχνάμε πως στη σύγχρονη κοινωνία, είτε το θέλουμε είτε όχι, πληρώνουμε το τίμημα για την υψηλής (;) ποιότητας ζωή που ζούμε. Π.χ. αν και είναι γνωστό πως για κάθε 2.000 χιλιόμετρα που διανύουμε με το αυτοκίνητό μας, υπάρχει μια πιθανότητα να υποστούμε θανατηφόρο τροχαίο ατύχημα, (στατιστική μελέτη στις Η.Π.Α. όπου κάθε χρόνο πεθαίνουν 55.000 άτομα σε τροχαία ατυχήματα σε ένα σύνολο 100 εκατομμυρίων ατόμων που κινούνται με αυτοκίνητα και διανύουν ο καθένας 16.000 χιλιόμετρα το χρόνο κατά μέσο όρο), εν τούτοις η χρήση των μεταφορικών αυτών μέσων

Πίνακας XXXIV. Επικινδυνότητα πρόκλησης θανάτων από διάφορες αιτίες

Είδος ατυχήματος	1 σε	4.000	άτομα
Φωτιά - Εμπρησμός	1 σε	25.000	»
Αεροπλάνα	1 σε	100.000	»
Ανεμοστρόβιλοι	1 σε	2.500.000	»
Όλα τα ατυχήματα μαζί	1 σε	1.600	»
Πυρηνικοί αντιδραστήρες	1 σε	300.000.000	»

δεν λιγοστεύει αλλά αντίθετα αυξάνει. Κάτι αντίστοιχο φυσικά συμβαίνει και με το κάπνισμα (50.000 θάνατοι το χρόνο από καρκίνο του πνεύμονα στις Η.Π.Α.). Άλλοι υπολογισμοί δείχνουν πως η επικινδυνότητα (να πάθει κανείς λευχαιμία), από την απλή ακτινογραφία του θώρακος, αντιστοιχεί με εκείνη που έχει κανείς να πάθει καρκίνο του πνεύμονα, καπνίζοντας 2 τσιγάρα σ' όλη του τη ζωή, ή με εκείνη που έχει κανείς (να πάθει θανατηφόρο τροχαίο ατύχημα) διανύοντας 8 χιλιόμετρα με το αυτοκίνητό του. Ή ακόμα, η επικινδυνότητα από ακτινοβόληση - θεραπεία θυρεοειδούς με ραδιενεργό ιώδιο (δηλ. δόση 15 rems) αντιστοιχεί με κάπνισμα 2.000 τσιγάρων σ' όλη τη διάρκεια της ζωής, ή με οδήγηση 8.000 χιλιομέτρων. Τέλος, η επικινδυνότητα από τη λειτουργία 100 πυρηνικών αντιδραστήρων (στις Η.Π.Α.), αντιστοιχεί με το κάπνισμα 1/15 τσιγάρου ή με οδήγηση 150 μέτρων. Όμως η επικινδυνότητα των λειτουργούντων πυρηνικών αντιδραστήρων δεν θα πρέπει να εκτιμηθεί με βάση την πρόκληση άμεσων θανάτων αλλά με μια ενδεχόμενη διαρροή ραδιενέργειας που έχει μακροχρόνιες επιπτώσεις. Έπειτα, σοβαρά προβλήματα θα δημιουργηθούν στο μέλλον από τα ραδιενεργά απόβλητα των πυρηνικών εργοστασίων που ανέρχονται σήμερα σε 100.000 περίπου Μεγακιουρί (Πίνακας XXXV).

Αυτό βέβαια που πρέπει να επισημανθεί είναι πως ο κάθε άνθρωπος θα πρέπει να έχει την πρωτοβουλία της επιλογής για να εκτεθεί σε κάποιο κίνδυνο, πράγμα που συμβαίνει με το κάπνισμα ή με την οδήγηση αλλά δεν συμβαίνει με

ΠΙΝΑΚΑΣ XXXV. Συσώρευση Ραδιενεργών καταλοίπων από τη χρήση Πυρηνικών εργοστασίων ισχύος

Ραδιονουκλίδιο	Ημιζωή	Ενεργότητα προϊόντων σχάσης (MCi)		
		1980	1990	2000
¹³⁷ Cs	30y	710	2,300	6,000
⁹⁰ Sr	28y	810	2,600	6,900
⁹¹ Y	59d	5,100	13,000	33,000
⁸⁹ Sr	53d	3,900	10,000	25,000
⁹⁵ Zr	66d	5,400	14,000	35,000
⁹⁵ Nb	35d	5,500	14,000	36,000
¹⁰³ Ru	40d	2,500	6,500	16,000
¹⁰⁶ Ru	368d	280	730	1,800
¹²⁹ Te	34d	290	750	2,000
¹³¹ I	8.1d	2,300	6,300	16,000
¹⁴⁰ Ba	12.8d	5,400	15,000	35,000
¹⁴¹ Ce	32.5d	5,100	14,000	34,000
¹⁴³ Pr	13.6d	5,300	14,000	35,000
¹⁴⁴ Ce	284d	4,700	13,000	31,000
¹⁴⁷ Pm	2.62y	1,500	4,000	10,000
⁸⁵ Kr	10.8y	90	270	700
¹³³ Xe	5.3d	5,600	15,000	37,000
¹⁴⁷ Nd	11.1d	2,200	5,900	15,000
¹⁵¹ Sm	87y	2	7	20
		56,700	152,000	376,000

την ακτινοβολήση μετά από πυρηνικό ατύχημα. Γι' αυτό και πολλοί είναι διστακτικοί στην αποδοχή της κατασκευής πυρηνικών αντιδραστήρων. Πράγματι, εάν δεν εξαντληθούν πρώτα οι άλλες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας δεν είναι λογική μια τέτοια επιλογή αφού μάλιστα είναι γνωστό ότι «η πυρηνική καταστροφή δεν γνωρίζει σύνορα». Παρόμοια αντιμετώπιση άμεσης αδρανοποίησης θα πρέπει να γίνει και για τα πυρηνικά όπλα (πυρηνικές κεφαλές) στις διάφορες χώρες (12.700 στη Η.Π.Α., 10.500 στη Ε.Σ.Σ.Δ., 850 στην Κίνα, 350 στη Γαλλία, 180 στην Αγγλία) που αποτελούν άμεση απειλή για το μέλλον της ανθρωπότητας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

(Οι αναφορές με αστερίσκο χρησιμοποιήθηκαν στο εγχειρίδιο αυτό)

- *Ackerman, E. et al (1979) Biophysical science. Prentice Hall, Inc. New Jersey.
- *Alderson, P.O. et al (1976) Radiopharmaceuticals. In "Diagnostic, nuclear medicine", Gottschalk, A., and Potchem E.J. (editors). Williams and Wilkins, Baltimore.
- *Alexander, P. (1957) Atomic Radiation and Life. Penguin Books Ltd. Alexandroupoulos, N.G., et al (1986) Chernobyl fallout in Ioannina Greece. Nature 322, 779.
- *Αλεξοπούλου, Κ. (1956) Ατομική και Πυρηνική Φυσική. Αθήνα
- *Andrews, H.L. (1974) Radiation Biophysics. Prentice-Hall, N. Jersey. Annals, ICRP (International Committee for Radiation Protection). Pergamon Press, Oxford.
- *Bacq, Z.M. and Alexander, P (1955) Principes de Radiobiologie. Masson et Cie, Paris.
- Bacq, Z.M. and Alexander, P (1961) Fundamentals of Radiobiology. Pergamon Press, Oxford.
- Barnes, E. (1982) Basic Physics of Radiotracers. C.R.C. Press Inc. Florida.
- Berg, G.G., and Maillie, H.D. (1981) Measurement of risks. Plenum, N. York
- Bergonie, J. et Tribondeau, L. (1906) Comptes Rendus, Acad. Sciences, Paris, 143, 983.
- Bond, V.P. (1981) Radiobiological input to radiation protection standards. Health Physics 41, 799.
- Bond, V.P., Fliedner, T.M., and Archambeau, J.O. (1965) Mammalian Radiation lethality. Academic Press.
- Brandon, W.F., et al. (1978) Chromosome aberrations as a biological dose-response indicator of radiation exposure in uranium miners. Radiation Research, 76, 159.
- Brodsky, A. (1979) Radiation measurement and protection. C.R.C. Press Inc., Florida, U.S.A.
- Buchsbaum R. (1958) Specific response to radiation; Radioecology. In, "Radiation Biology and Medicine", pp. 124-141. W. Claus (editor) Casarett, A.P. (1968) Radiation Biology. Prentice Hall, Inc.
- Clauss, W.D. (1958) Radiation Biology and Medicine. Addison-Wesley Publ. Co. Inc. Mass., U.S.A.
- *Coggle, J.E. (1971) Biological Effects of Radiation. Wykeham Publications, London.
- Cogne, F. (1985) Progress of Nuclear Safety. Rev. Gen. Nucl. 1, 17.
- Cohen, B.L. (1985) Comparison of radiologic risks from coal burning and nuclear power. Health Physics 48, 342
- Cohen, L. (1983) Biophysical models in Radiation Oncology. CRC Press, Inc
- Colombetti, L.G. (1979) Principles of Radiopharmacology. CRC Press, Inc.
- Crick, M.J., and Linsley, G.S. (1984) An assessment of the radiological impact of the Windscale reactor fire, October 1957. International Journal of Radiation Biology, 46, 479.
- Dertinger, J., and Jung, H. (1970) Molecular Radiation Biology. Springer Verlag, New York.
- Doll, R. (1981) Radiation Hazards: 25 years of collaborative research. British Journal of Radiology 54, 179.
- *Δωρικός, Σ. (1984) Θερμομεταλλικές Πηγές της Χώρας. Εκδόσεις Υπουργείου

Ενέργειας και Φυσικών πόρων, Αθήνα.

- Elkind, M.M., and Whitmore, G.F. (1967) Radiobiology of Cultured mammalian cells. Gordon Breach, New York.
- Fabrikant, J.I. (1981) Health effects of the nuclear accident at three-mile Island. Health Physics 40,151
- *Floyd, R.A. (1982) Free Radicals and Cancer. Marcel Dekker, Inc. New York
- Fritzberg, A.R. (1986) Radiopharmaceuticals. Progress and Clinical perspectives. CRC Press Inc., Florida.
- *Γεράνιου, Θ.Κ. (1985) Πυρηνική Τεχνολογία. Αθήνα
- Glenn, H. (1982) Biological applications of radiotracers. CRC Press Inc.
- Gray, L.H. (1953) British Journal of Radiology 26, 638
- *Hall, E. (1981) Radiation and Life. Prentice Hall, New York.
- *Henshaw, P.S. (1958) Whole-body irradiation syndrome. In, "Radiation Biology and Medicine", pp. 317-340
- Hickey, R.J. et al (1981) Low level ionizing radiation and human mortality. Health Physics 40,625
- *Hoppe, W. et al (1983) Biophysics. Springer-Verlag, Berlin.
- Horowitz, Y.S. (1984) Thermoluminescent and dosimetry. CRC Press, Inc.
- *Huang, R.L. et al (1973) The Chemistry of Free radicals. Edward Arnold
- *Ingram, D.J. (1958) Free Radicals as studied by electron spin resonance Butterworths, London
- International Atomic Energy Agency (IAEA) Publications
- Jablon, N.S., and Kato, H. (1972) Studies of the mortality in Atom bomb survivors. Radiations Dose in mortality 1950-1970. Radiation Research 50, 649.
- Johns, H.E. (1969) The Physics of Radiology. C.C. Thomas Springfield, Ill.
- *Kamen, M.D. (1951) Radioactive Tracers in Biology. Academic Press, N.York
- *Καραγκούνη, Γ. (1985) Προς την Δυσία της Ατομικής θεωρίας της Ύλης. Πρακτικά Ακαδημίας Αθηνών. Συνεδρία 15-1-85
- Kereiakes, J.G. and Rosenstein, M. (1985) Radiation Doses in nuclear medicine and diagnostic X-ray. CRC Press, Inc.
- *King, R.C. (1976) Dictionary of Genetics. Oxford University Press
- Klement, A. (1982) Handbook of Environmental Radiation. CRC Press Inc.
- *Lawrence, P. (1971) Cellular Radiobiology. Edward Arnold.
- Lea, D.E. (1956) Actions of Radiations on Living Cells. 2nd Edition, Cambridge University Press.
- Manusco, T.F. et al (1977) Radiation exposures on Harford workers dying from cancer and other causes. Health Physics 33,369.
- Mason, T.J., and Miller, R.W. (1974) Cosmic Radiation at high altitudes and cancer mortality. Radiation Research 60,302.
- Matanoski, G. et al (1975) The current mortality rates of radiologists and other physician specialists. American J. Epidemiology 101,199
- Matheson, M.S., and Dorfman, L.M. (1969) Pulse Radiolysis. MIT Press. Cambridge, Mass., U.S.A.
- Mckenzie, J. (1965) Breast cancer following multiple fluoroscopies. British Journal of Cancer 19,1.
- Mossman, K.L., and Hill, L.T. (1982) Radiation risks in pregnancy. Obst. Gynecology 60,237.
- *Muller, H.J. (1958) Mutational effects of Radiation. In "Radiation Biology and Medicine", pp.145-177. W. Clauss (editor)
- Nakamura, K. (1977) Stomach cancers in atomic bomb survivors. Lancet 2,866.
- National Radiological Protection Board (NRPB) Publications
- *Niemann, E.G. (1983) Radiation Biophysics. In, "Biophysics", Hoppe, W., et al (editors). Springer-Verlag, Berlin.
- *Παυταζή, Γ.Π. (1959) Μαθήματα Ραδιobiολογίας. Εκδόσεις Ε.Ε.Α.Ε.
- *Περιοτεράκη, Σ.Γ. (1969) Ατομική και Πυρηνική Φυσική. Εκδόσεις Ε.Ε.Α.Ε.
- *Περιοτεράκη, Σ.Γ. (1969) Ασκήσεις Ατομικής και Πυρηνικής Φυσικής. Εκδόσεις Ε.Ε.Α.Ε.
- Piroux, H. (1962) Les Radioisotopes et leurs applications industrielles Bibliotheque Technique Philips.

- Pizzarello, D.J. (1982) Radiation Biology. CRC Press, Inc. Florida.
- Platzman, R.L., and Frohlich, H. (1953) Phys. Rev. 92, 1152
- * Platzman, R.L. (1958) The physical and chemical basis of mechanisms in Radiation Biology. In, "Radiation Biology and Medicine", pp. 15-72. W. Claus, Editor.
- * Pochin, E. (1983) Nuclear Radiation: Risks and Benefits. Clarendon Press Oxford
- Prasad, N. (1981) Radiotherapy and cancer immunology. CRC Press, Inc.
- Prasad, N. (1984) Handbook of Radiobiology. CRC Press, Inc.
- Proukakis, C., and Lindop, P.J. (1967) Age-dependence of the radiation sensitivity of haemopoietic cells in the mouse. Nature. 215, 655
- * Προυκάκης, Χ. (1981) Ιατρική Φυσική. Τόμος 1ος: Ιατρική Ακτινοφυσική. Εκδόσεις Παρισιάδου, Αθήνα.
- * Προυκάκης, Χ. (1987) Πυρηνικά ατυχήματα. Κίνδυνοι και προστασία της υγείας. Εκδόσεις Παρισιάδου, Αθήνα.
- Rallison, M.L., et al. (1974) Thyroid disease in children. American J. of Medicine 56, 457
- Richter, M.P., et al. (1984) Current status of high linear energy transfer irradiation. Cancer 54, 2814
- Robbins, L. (1976) Diagnostic Radiology. Williams and Wilkins, Baltimore
- Rogers, A.W. (1979) Techniques of autoradiography. Elsevier, N.York.
- * Russell, W.L. (1958) Radiation Genetics of mammals. In, "Radiation Biology and Medicine", pp. 189. W. Claus, editor.
- Rutherford, E., Chadwick, J., and Ellis, C.D. (1930) Radiations from radioactive substances. Cambridge University Press.
- Sammuel, A.H. and Maggee, G. (1953) J. Chem. Physics 21, 1080
- Schmidt, H.L., et al. (1982) Stable Isotopes. Elsevier Publ. Co. Amsterdam
- * Shapiro, J. (1972) Radiation Protection. Harvard University Press
- * Spear, F.G. (1953) Radiation and Living Cells. Chapman and Hall, Ltd.
- Spencer, R.P. (1982) Nuclear Medicine. CRC Press, Inc. Florida.
- * Starleton, G. (1958) Biochemical and Cellular effects. In, "Radiation Biology and Medicine", pp. 73. W. Claus, editor.
- * Swanson, C.P. and Merz, T. (1958) Radiation cytology. In, "Radiation Biology and Medicine", pp. 178. W. Claus, editor.
- Van Cleave, C.D. (1963) Late somatic effects of ionizing Radiation. U.S. Atomic Energy Commission.
- Vennart, J. (1969) Radiotoxicology of tritium and C-14 compounds. Health Physics 16, 429
- Waggner, R.G. (1982) Medical Physics. CRC Press, Inc., Florida
- Wagner, H.N. (1968) Principles of Nuclear Medicine. Jaunders, Philadelphia
- Wang, Y. (1969) Handbook of radioactive nuclides. Chemical Co., Cleveland
- Whicker, W. (1982) Radioecology: Nuclear energy and the environment. CRC Press, Inc., Florida
- Yen Wang, M.D. (1986) Computer tomography of the abdomen. CRC Press, Inc.
- Zarrabi, M.H., and Rosner, F. (1979) Acute myeloblastic leukemia following treatment of cancers. A review. Am. J. Haematology 7, 357

ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ

- Ακτινοβολία (Radiation):** Μορφή ενέργειας που μεταδίδεται μέσω υλικών σωμάτων ή και μέσω του κενού.
- Ακτινοβολία φυσικού υποστρώματος (Natural background radiation):** Το σύνολο των ακτινοβολιών ιονισμού που προέρχονται από γήινες και κοσμικές πηγές χωρίς την παρέμβαση του ανθρώπου.
- Ακτινοπροστασία (ραδιοπροστασία) πληθυσμού:** Το σύνολο των διαδικασιών που πρέπει να λειτουργούν από το κράτος για την επισήμανση αύξησης της ραδιενέργειας του περιβάλλοντος, την ενημέρωση των πολιτών και την εξουδετέρωση των παραγόντων που την προκαλέσαν. Ο παραπάνω έλεγχος πρέπει να γίνεται και οπουδήποτε χρησιμοποιούνται ιονίζουσες ακτινοβολίες για διαγνωστικούς, θεραπευτικούς ή άλλους σκοπούς.
- Αξονική Τομογραφία με Η/Υ (CT ή CAT - Computerized axial tomography):** Χρησιμοποίηση λεπτής δέσμης ακτίνων-Χ για κυκλική ακτινογράφιση περιοχής του σώματος και απεικόνιση των εσωτερικών οργάνων με μορφή «τομής».
- Αρχή ALARA (as low as reasonably achievable):** Αναφέρεται σε έκθεση σε ιονίζουσες ακτινοβολίες για διαγνωστικούς σκοπούς που πρέπει να είναι «τόσο χαμηλή όσο είναι λογικά εφικτό».
- Αυτοσπινθηρογραφία ή αυτοφλουορογραφία (autofluorography):** Διαδικασία ανίχνευσης ύπαρξης ραδιενέργειας σε ένα δείγμα με χρήση ενδιάμεσου υγρού - σπινθηριστή (fluor π.χ. P.P.O.) και φωτογραφικού φιλμ.
- Γραμμική μεταβίβαση ενέργειας (LET - Linear Energy Transfer):** Δείχνει το ποσό αρχικής ενέργειας ενός σωματιδίου που παρέχεται ανά μήκος τροχιάς του μέσα στην ύλη και είναι αποτέλεσμα ιονισμών και άλλων φαινομένων.
- Διεθνής Επιτροπή Ραδιοπροστασίας (ICRP - International Commission for Radiation Protection).**
- Διεθνές σύστημα μονάδων (SI - Systéme Internationale):** Καθιερώθηκε στα 1960 και περιλαμβάνει τις μονάδες Gray (Gy), Sievert (Sv) και Bequerel (Bq).
- Έκθεση στην ακτινοβολία:** Διακρίνεται σε α) εξωτερική (από πηγές του περιβάλλοντος, β) εσωτερική (από πηγές εντός του οργανισμού) και γ) ολική έκθεση που είναι το άθροισμα της εξωτερικής και της εσωτερικής.
- Έκθεση Μερική:** Η έκθεση στην ακτινοβολία ενός μέρους του οργανισμού.
- Έκθεση Ολόσωμη:** Η έκθεση που θεωρείται ομοιογενής για ολόκληρο το σώμα.
- Επιτροπή Ηνωμένων Εθνών (UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation):** Ιδρύθηκε κατά τη Γενική Συνέλευση του Ο.Η.Ε. στα 1955.
- Ιονίζουσα Ακτινοβολία:** Αποτελείται από φωτόνια (ακτίνες-Χ και γ) ή από σωματίδια (α, β, νετρόνια, κ.λ.π.) ικανά να προξενήσουν σχηματισμό ιόντων άμεσα ή έμμεσα.

- Ισοδύναμο δόσης:** Εκφράζει το γινόμενο της απορροφούμενης δόσης (D) και του συντελεστή ποιότητας Q. Μετράται σε rem (roentgen equivalent man) και σε Sievert (Sv) όπου $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem} = 1 \text{ Joule/Kg}$.
- Κουάρκς (quarks):** Συστατικά των πρωτονίων.
- Λυχνία Coolidge:** Ηλεκτρονική λυχνία με νήμα, άνοδο και κενό αέρα, για παραγωγή ακτίνων-X με θερμιονική εκπομπή ηλεκτρονίων.
- Λυχνία Crookes:** Ηλεκτρονική λυχνία με δύο ηλεκτρόδια και κενό αέρα, για παραγωγή ακτίνων-X χωρίς θερμιονική εκπομπή ηλεκτρονίων.
- Μυόνιο (Muon):** Ασταθές υποατομικό σωματίδιο με μάζα ενδιάμεση εκείνης του ηλεκτρονίου και του πρωτονίου.
- Όριο ετήσιας πρόσληψης:** Η ποσότητα ραδιενεργής ουσίας που όταν προσληφθεί από έναν οργανισμό προκαλεί μια δεσμευμένη δόση ίση προς το αντίστοιχο όριο ετήσιας δόσης.
- Πηγή ραδιενέργειας:** Συσκευή ή ουσία που εκπέμπει ιονίζουσες ακτινοβολίες (φωτόνια ή σωματίδια).
- Πόνιο (ή π-μεσόνιο):** Ασταθές υποατομικό σωματίδιο με μάζα ενδιάμεση εκείνης του ηλεκτρονίου και του πρωτονίου.
- Πρόσληψη ραδιενέργειας:** Η είσοδος ραδιενεργού ουσίας σε έναν οργανισμό.
- Πυρηνικό ατύχημα:** Απρόβλεπτο περιστατικό που προκαλεί ζημιές ή διαταραχές λειτουργίας σε μια εγκατάσταση και ενδεχόμενα συνεπάγεται έκθεση σε ραδιενέργεια ενός ή περισσότερων ανθρώπων.
- Ραδιενέργεια:** Το πηλίκο του dN/dt όπου dN είναι ο αριθμός των αυθόρμητων πυρηνικών μετασχηματισμών που γίνονται σε μία ποσότητα ραδιενεργού ισότοπου, σε χρόνο dt .
- Ραδιενεργή ουσία:** Κάθε ουσία που περιέχει ένα ή περισσότερα ραδιοϊσότοπα, των οποίων η ραδιενέργεια δεν μπορεί να αγνοηθεί από άποψη ραδιοβιολογικής προστασίας.
- Ραδιενεργή μόλυνση:** Η μόλυνση οποιουδήποτε υλικού (βιολογικού ή όχι) από ραδιενεργές ουσίες (συμπεριλαμβάνονται εξωτερική και εσωτερική έκθεση στην ακτινοβολία) σε συγκεντρώσεις άνω των ορίων που έχουν θεσπιστεί.
- Ραδιοθεραπεία (radiotherapy):** Η εφαρμογή των ιονιζουσών ακτινοβολιών (φυσικών και τεχνητών) για τη θεραπεία ασθενειών.
- Ραδιοϊσότοπο (radio-isotope):** Ραδιενεργό στοιχείο που κατέχει την ίδια θέση (Τόπο) με άλλο μη ραδιενεργό, στον «περιοδικό πίνακα των στοιχείων».
- Ραδιονόσηση (radiation sickness):** Συμπτώματα στην υγεία του ανθρώπου σαν αποτέλεσμα επίδρασης ιονίζουσας ακτινοβολίας (π.χ. διάρροια, πυρετός, απώλεια βάρους, εξάντληση, κ.λ.π.).
- Ραδιονουκλίδιο:** Ασταθής πυρήνας που εκπέμπει ιονίζουσα ακτινοβολία (φωτόνια ή σωματίδια) διασπώμενο δηλ. παρουσιάζει ραδιενέργεια.
- Ραδιοπροστασία (radiation protection):** Η εφαρμογή διαφόρων μεθόδων για την προστασία από τις επιπτώσεις των ιονιζουσών ακτινοβολιών.
- Ραδιοτοξικότητα:** Εκφράζει τη ραδιενεργή αλλά και χημική συμπεριφορά μιας ραδιενεργού ουσίας σε σχέση και με το μεταβολισμό της μέσα στον οργανισμό μετά από πρόσληψη.
- Στοχαστική επίπτωση (stochastic effect):** Πιθανολογική εκτίμηση επιπτώσεων που αυξάνεται με αύξηση της δόσης.
- Συντελεστής ποιότητας (Q)** που αποτελεί αριθμητική έκφραση της ευκολίας ή δυσκολίας για «γραμ-

μική μεταβίβαση ενέργειας» μιας συγκεκριμένης κατηγορίας φωτονίων ή σωματιδίων. Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του «ισοδύναμου δόσης» (rem και υποδιαιρέσεις) από την απορροφούμενη δόση (Gy ή rad) ή την έκθεση (Roentgen).

Συντελεστής ποιότητας, Ενεργός (\bar{Q}) που εκφράζει ότι και ο Q αλλά όταν η ακτινοβολία περιέχει διαφορετικά φωτόνια ή σωματίδια με διαφορετικές τιμές «γραμμικής μεταβίβασης ενέργειας» (LET).

Σχετική Βιολογική Επίπτωση (RBE - relative Biological effectiveness): Είναι ο λόγος της δόσης π.χ. νετρονίων που απαιτείται για να προκληθεί ένα αποτέλεσμα, προς τη δόση ακτίνων-X για το ίδιο αποτέλεσμα.

Χρόνος ημιζωής (half life): (Φυσικός, Βιολογικός) Καλείται και χρόνος υποδιπλασιασμού γιατί στο χρόνο αυτό έχει διασπαστεί ο μισός αριθμός των αρχικών ατόμων. Ο χρόνος ποικίλει από 10^{-7} sec μέχρι και 10^{16} χρόνια (!) δηλ. 10.000.000 φορές περισσότερο από την ηλικία της Γης.

ΦΥΣΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ

Ταχύτητα του φωτός στο κενό (c)	: $2,9979 \times 10^{10}$ cm/sec
Σταθερά του Avogadro (N_A)	: $6,02486 \times 10^{23}$ γραμ/mol
Φορτίο ηλεκτρονίου (q)	: $4,903 \times 10^{-10}$ Η.Σ.Μ. φορτίου
	: $1,6021 \times 10^{-20}$ Η.Μ.Μ. φορτίου
	: $1,6021 \times 10^{-19}$ coulomb
Μάζα ηρεμίας ηλεκτρονίου (m_e)	: $9,1083 \times 10^{-28}$ γραμ.
	: $0,510976$ Mev
Μάζα ηρεμίας πρωτονίου (m_p)	: $1,6747 \times 10^{-24}$ γραμ.
	: $938,211$ Mev
Μάζα ηρεμίας νετρονίου (m_n)	: $1,6747 \times 10^{-24}$ γραμ.
	: $939,505$ Mev
Σταθερά του Planck (h)	: $6,62517 \times 10^{-27}$ erg·sec
Ακτίνα τροχιάς ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου (r_0)	: $5,29172 \times 10^{-9}$ cm = $0,529172$ Å
Ακτίνα του ηλεκτρονίου (r_e)	: $2,81785 \times 10^{-13}$ cm = $0,000028$ Å

ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

	joule	ev	erg	cal
1 joule	1	$6,24 \times 10^{18}$	10^7	0,239
1 ev	$1,6 \times 10^{-19}$	1	$1,6 \times 10^{-12}$	$3,83 \times 10^{-20}$
1 erg	10^{-7}	$6,24 \times 10^{11}$	1	$2,39 \times 10^{-8}$
1 cal	4,19	$2,61 \times 10^{19}$	$4,19 \times 10^7$	1

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ

Ακτίνες-γ	2.1., 2.2.1., 2.2.5., 2.3.2.
Ακτίνες-X — ιδιότητες	1.1., 2.2.1., 2.3.2.
Ακτίνες-X — εφαρμογές	5.1.
Ακτινοβολίες	1.1., Πίνακας I
Ακτινοθεραπεία	5.3.
Ακτινοπάθεια	4.9.
Άμεση δράση	3.1., 3.3.
Άνθρακας-14	Πίνακας V
Αντιδραστήρας	2.2.5.
Αξονική τομογραφία	5.2.3.
Ασβέστιο-45	Πίνακας V
Άτομο	1.1.
Αυτοραδιογραφία	2.5.4., 5.2.3.
Αυτοσπινθηρογραφία	5.2.3.
Βισμούθιο	2.1.2., Πίνακας III
Γήινη ακτινοβολία	2.6.
Γραμμική μεταβίβαση ενέργειας (LET)	2.3.1., Πίνακας VIII
Gray (μονάδα)	2.4.3.
Δίδυμη γένεση	2.2.1.
Ειδικός ιονισμός	2.2.2., 2.3.1., 2.3.2.
Ελεύθερες ρίζες	2.3.4., 2.3.5., 3.1., 3.4.
Έμμεση δράση	3.1., 3.3.
Ένζυμο	3.3.
Επιτρεπόμενες δόσεις	2.6., 2.6. στο τέλος
Εσωτερική μετατροπή	5.2.2.
Ηλεκτρόνια Auger	5.2.2.
Θάλαμος ιονισμού	2.5.1.
Θάλαμος Wilson	2.3.1.
Θείαφι-35	Πίνακας V
Θεωρία των στόχων	3.2.2.
Θόριο	2.6.
Ιονίζουσες ακτινοβολίες	1.1.
Ισοδύναμη δόση	2.4.4.
Ισομερής μετάπτωση	5.2.2.
Ιώδιο-131	4.1.1., 4.13.
Καίσιο-137	4.1.1., 2.12.
Κάλιο-40	2.6.
Κβάντα	1.1.
Κιουρί (μονάδα)	2.4.1.
Κοσμική ακτινοβολία	2.1.3., 2.6.
Λευχαιμία	4.3.2., 4.5.
Λυχνία Coolidge	2.1.
Λυχνία Crookes	2.1.
Μεσόνια	2.1.3.
Μεταστοιχείωση	2.2.5.

Μετασχηματισμός κυττάρων (transformation)	4.3.2.
Μπεκερέλ (μονάδα)	2.4.1.
Ναγκασάκι	4.5.
Νετρόνια	2.1., 2.2.5.
Όρια δόσεων	2.6.
Πολώνιο	2.6.
Πρωτόνια	2.1., 2.2.4.
Πυκνότητα ιονισμού	2.2.2.
Πυρηνικά ατυχήματα	5.5.2.
Πυρηνικά εργοστάσια	5.5.1., Πίνακας XXIX
Πυρηνικά όπλα	5.4.
Ραδιοανοσολογία	2.5.5.
Ραδιοβιολογία	1.1.
Ραδιοευαισθησία	3.5., 4.7.
» ιστών	4.4., 4.8.
» μακρομορίων	4.1.2.
» μεμβρανών	3.1.3.
» νουκλεϊνικών οξέων	4.1.3.
» οργανισμών	4.5., Πίνακας XX
» πρωτεϊνών	4.1.3.
» πυρήνα	4.
» πυρήνων	4.2.
» χρωμοσωμάτων	4.2.
Ραδιοθεραπεία	5.3.
Ραδιοϊσότοπα — εφαρμογές	5.2., 5.2.1., 5.2.3.
Ραδιοϊσότοπα — ιδιότητες	2.1., 2.2.5., 5.2.2., Πίνακας V, XXI, XXII
Ραδιόλυση του νερού	3.4.1.
Ραδιο-οικολογία	4.14.
Ραδιοπηγές	2.6.
Ραδιοπροστασία	3.3., 4.7., 4.13.
Ραδιοτοξικότητα	Πίνακας XXVII
Ραδόνιο	2.6.
Rem (μονάδα)	2.4.4.
Rad (μονάδα)	2.4.3.
Roentgen (μονάδα)	2.4.2.
Ρυθμός έκθεσης	2.4.
Σπινθηρογράφημα	5.2.3.
Στρόντιο-90	Πίνακας V, 4.12.
Στρόντιο	2.6.
Συντελεστής G	3.3.
Συντελεστής Q	2.4.4.
Σύλληψη ηλεκτρονίου	5.2.2.
Σύλληψη νετρονίου	2.2.5.
Σχετική βιολογική επίπτωση (RBE)	2.4.4.
Σωματίδια-α	2.1., 2.2.2.
Σωματίδια-β	2.1., 2.2.3.
Sievert (μονάδα)	2.4.4.

Τεχνήτιο
 Τομογραφία
 Τσερνόμπιλ
 Τρίτιο
 Φαινόμενο Κόμπτον
 Φυσική ακτινοβολία
 Φωσφόρος-32
 Φωτοβιολογία
 Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο
 Χιροσίμα
 Χρόνος υποδιπλασιασμού

Πίνακας XXIII
 5.2.3.
 5.5.2., Πίνακες XXX-XXXIII
 Πίνακας V
 2.2.1.
 2.6., Πίνακας XIII
 Πίνακας V
 1.1.
 2.2.1.
 4.5.
 2.4.1., 5.2.2.

Βιογραφικά στοιχεία: Ο συγγραφέας γεννήθηκε στη Ν. Ερυθραία Αττικής (1943) και τέλειωσε το Γυμνάσιο Κηφισιάς. Πήρε πτυχίο Φυσικών Επιστημών (1969) και διδακτορικό Βιολογικών Επιστημών (1974) από το Πανεπιστήμιο της Αθήνας. Διετέλεσε ερευνητής και συνεργάτης διδασκαλίας Κυτταρικής Βιολογίας στα Βιολογικά Εργαστήρια του Παν/μίου Harvard (1974-1976) και έγινε Υφηγητής Βιολογίας από το Βιολογικό Τμήμα του Παν/μίου Αθηνών (1982) όπου είναι Αναπληρωτής Καθηγητής στον Τομέα Βιοχημείας, Κυτταρικής-Μοριακής Βιολογίας και Γενετικής και διδάσκει Ραδιοβιολογία και Κυτταρική Βιολογία.