
**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΕΙΡΑΙΩΣ**



**ΤΜΗΜΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ
ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ και ΔΙΟΙΚΗΣΗ της ΥΓΕΙΑΣ»**

**Η ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΕΝΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΚΑΙ Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΤΗ
ΧΩΡΑ ΜΑΣ**

ΚΟΡΝΗΛΙΑ ΜΠΕΜΠΗ

Διπλωματική Εργασία υποβληθείσα στο Τμήμα Οικονομικής Επιστήμης
του Πανεπιστημίου Πειραιώς για την απόκτηση
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στα Οικονομικά και Διοίκηση της Υγείας.
Πειραιάς, 2019

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΕΙΡΑΙΩΣ**



**ΤΜΗΜΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ
ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ και ΔΙΟΙΚΗΣΗ της ΥΓΕΙΑΣ»**

**Η ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΕΝΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΚΑΙ Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΤΗ
ΧΩΡΑ ΜΑΣ**

Κορνηλία Μπεμπή, Α.Μ.: ΟΔΥ/1737

Επιβλέπουσα: Κορνηλία Δελούκα- Ιγγλέση / Καθηγήτρια / Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Διπλωματική Εργασία υποβληθείσα στο Τμήμα Οικονομικής Επιστήμης
του Πανεπιστημίου Πειραιώς για την απόκτηση
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στα Οικονομικά και Διοίκηση της Υγείας.
Πειραιάς, 2019

UNIVERSITY of PIRAEUS



**DEPARTMENT of
ECONOMICS**

M.Sc. in Health Economics and Management

**EUROPEAN UNION LEGISLATION ON RADIATION
PROTECTION AND ITS IMPLEMENTATION IN OUR
COUNTRY**

Kornilia Bempi

Master Thesis submitted to the Department of Economics
of the University of Piraeus in partial fulfillment of the requirements
for the degree of M.Sc. in Health Economics and Management

Piraeus, Greece, 2019

Στην οικογένειά μου και στον Κωνσταντίνο

Η νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την ακτινοπροστασία και η εφαρμογή της στη χώρα μας.

Σημαντικοί όροι: ιοντίζουσες ακτινοβολίες, κανονισμοί ακτινοπροστασίας, νομοθεσία, υγεία, επαγγελματίες υγείας

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στη νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης, για τον καθορισμό των βασικών προτύπων ασφάλειας και για την προστασία από τους κινδύνους που προκύπτουν από τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Η προστασία των ανθρώπων και του περιβάλλοντος από τις επιβλαβείς επιδράσεις των ιοντιζουσών ακτινοβολιών που προέρχονται από την ειρηνική τους χρήση εξασφαλίζεται από τους κανονισμούς ακτινοπροστασίας. Η Ευρωπαϊκή Κοινότητα Ατομικής Ενέργειας (European Atomic Energy Community-Euratom) είναι αρμόδια για τη νομοθεσία περί ακτινοπροστασίας στην Ευρώπη. Στην Ελλάδα όργανο της πολιτείας για θέματα ακτινοπροστασίας, πυρηνικής ενέργειας και πυρηνικής τεχνολογίας αποτελεί η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) που σύμφωνα με την κείμενη νομοθεσία έχει ρυθμιστικό-κανονιστικό ρόλο στα πεδία των αρμοδιοτήτων της. Ειδικότερα, προετοιμάζει και εισηγείται την απαιτούμενη νομοθεσία, προκειμένου να επιτευχθεί η ενσωμάτωση των Ευρωπαϊκών Οδηγιών της Euratom στο εθνικό δίκαιο.

Επίσης, στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε μια έρευνα με τη χρήση ερωτηματολογίων. Σκοπός της έρευνας ήταν να γίνει εκτίμηση του επιπέδου γνώσεων περί φυσικής των ακτινοβολιών, ακτινοπροστασίας και των εργασιακών πρακτικών σύμφωνα με τους κανονισμούς ακτινοπροστασίας των επαγγελματιών υγείας και του διοικητικού προσωπικού των τμημάτων Πυρηνικής Ιατρικής των Νοσοκομείων Π.Γ.Ν.Α. Αλεξάνδρα και Ν.Ι.Μ.Τ.Σ .

Στην παρούσα διατριβή διενεργείται βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με την ακτινοφυσική, τη ραδιοβιολογία, την ακτινοπροστασία και τη νομοθεσία που έχει θεσπιστεί για αυτήν και πρέπει να τηρείτο προσωπικό στα εργαστήρια όπου εκτελούνται εξετάσεις διαγνωστικές ή θεραπευτικές με τη χρήση ιοντιζουσών ακτινοβολιών. Εν συνεχεία πραγματοποιείται περιγραφική στατιστική, ανάλυση των δεδομένων της έρευνας και παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν με τη χρήση του IBM SPSS Statistics. Τέλος, ακολουθεί η εξαγωγή συμπερασμάτων και η διατύπωση προτάσεων.

European Union legislation on radiation protection and its implementation in our country.

Keywords: ionizing radiation, radiation protection regulations, legislation, health, health professionals

Abstract

This thesis focuses on European Union legislation to define basic safety standards and protect against the dangers of ionizing radiation. The protection of humans and the environment against the harmful effects of ionizing radiation from their peaceful use is ensured by radiation protection regulations. The European Atomic Energy Community (EURATOM) is responsible for radiation protection legislation in Europe. In Greece, a state body for radiation protection, nuclear energy and nuclear technology is the Greek Atomic Energy Commission (EEAE), which according to the legislation in force has a regulatory and regulatory role in its fields of competence. In particular, it prepares and recommends the necessary legislation in order to achieve the incorporation of the European Directives of Euratom into national law.

In the framework of the thesis, a questionnaire survey was also used. The purpose of the research was to assess the level of knowledge of radiation physics, radiation protection and working practices in accordance with the radiation protection regulations of health professionals and administrative staff of Nuclear Medicine Departments of the hospitals Alexandra and NIMTS.

In this thesis, a literature review of radio physics, radiobiology, radiation protection and the legislation is performed. The legislation must be followed by staff in laboratories where diagnostic or therapeutic tests are carried out using ionizing radiation. In addition, descriptive statistics, analysis of the research data are carried out and the results obtained using IBM SPSS Statistics are presented. Finally, conclusions are drawn and suggestions are made.

Περιεχόμενα

Περίληψη	ix
Abstract	xi
Κατάλογος Εικόνων	xvii
Κατάλογος Σχημάτων	xvii
Κατάλογος Συντομογραφιών	xix
Πρόλογος	xxi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ιστορική αναδρομή	
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Οι πρόδρομοι του Röntgen	1
1.3 Η ανακάλυψη των ακτίνων X	7
1.4 Ανακεφαλαίωση	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Η φυσική των ακτινοβολιών	
2.1 Εισαγωγή	11
2.2 Το άτομο	12
2.2.1 Η δομή του ατόμου	13
2.2.2 Οι βασικές ιδιότητες του ατόμου	15
2.2.3 Διέγερση, αποδιέγερση και ιονισμός	16
2.3 Η φύση και η παραγωγή των ακτίνων X	18
2.4 Δομή και σταθερότητα της πυρηνικής ύλης	21
2.5 Ραδιοϊσότοπα και ραδιενέργεια	22
2.5.1 Άλφα διάσπαση (ακτινοβολία α)	24
2.5.2 Βήτα ⁻ διάσπαση (ακτινοβολία β^-)	24
2.5.3 Βήτα ⁺ διάσπαση (ακτινοβολία β^+)	25
2.5.4 Ακτινοβολία γ	25
2.5.5 Η διεισδυτικότητα των ακτινοβολιών α , β και γ	26
2.6 Εκθετική απομείωση-Ο εκθετικός νόμος των ραδιενεργών διασπάσεων	27
2.7 Ανακεφαλαίωση	28

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Αλληλεπίδραση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας με την ύλη-Δοσιμετρία

3.1 Εισαγωγή	29
3.2 Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο	30
3.3 Το φαινόμενο Compton	30
3.4 Η Δίδυμη γένεση	32
3.5 Γραμμικός συντελεστής εξασθένισης	32
3.6 Ο Νόμος της εκθετικής εξασθένισης	33
3.7 Το πάχος υποδιπλασιασμού	34
3.8 Δοσιμετρία της ακτινοβολίας	34
3.8.1 Απορροφούμενη δόση	35
3.8.2 Έκθεση	35
3.8.3 Ισοδύναμη δόση	37
3.8.4 Ενεργός δόση	37
3.9 Ανακεφαλαίωση	39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ραδιοβιολογία-Ανιχνευτές ιοντίζουσών ακτινοβολιών

4.1 Εισαγωγή	41
4.2 Η κυτταρική δομή και η διαίρεση	42
4.3 Η βιολογική δράση των ιοντίζουσών ακτινοβολιών στο κύτταρο	46
4.4 Η διαίρεση των βιολογικών επιδράσεων στο κύτταρο	48
4.5 Τα καθορισμένα και τα στοχαστικά αποτελέσματα	49
4.6 Οι ανιχνευτές της ιοντίζουσας ακτινοβολίας με αέριο	50
4.6.1 Ο ανιχνευτής Geiger-Müller	51
4.6.2 Ο αναλογικός απαριθμητής	52
4.6.3 Ο ανιχνευτής ιονισμού	52
4.7 Ανιχνευτές σπινθηρισμού	53
4.8 Προσωπικά δοσίμετρα(δοσίμετρα θερμοφωταύγειας)	53
4.9 Ανακεφαλαίωση	55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ακτινοπροστασία

5.1 Εισαγωγή	57
5.2 Το διεθνές σύστημα ακτινοπροστασίας	58
5.3 Το ευρωπαϊκό σύστημα ακτινοπροστασίας	60
5.4 Το εθνικό σύστημα ακτινοπροστασίας	61
5.5 Αρχές, κανονισμοί και μέτρα ακτινοπροστασίας	64
5.5.1 Η ακτινοπροστασία του προσωπικού	65
5.5.2 Η ακτινοπροστασία των εξεταζόμενων	67
5.5.3 Η ακτινοπροστασία των εγκύων ασθενών	69
5.6 Η ακτινοπροστασία κατά τις εργασιακές πρακτικές	72
5.7 Ανακεφαλαίωση	77

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Ερευνητική μελέτη

6.1 Εισαγωγή	79
6.2 Ο σκοπός της ερευνητικής μελέτης	80
6.3 Η μεθοδολογία της ερευνητικής μελέτης	80
6.3.1 Ο τόπος και ο χρόνος διεξαγωγής της μελέτης	81
6.4 Η δομή και η σύνταξη του ερωτηματολογίου	81
6.5 Περιγραφική στατιστική και ανάλυση δεδομένων	82
6.5.1 Έλεγχος αξιοπιστίας (Reliability Analysis)	82
6.5.2 Παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων της έρευνας	84
6.5.3. Ανάλυση διασταύρωσης (crosstabulation)	91
6.6 Συμπεράσματα και προτάσεις	94
6.7 Ανακεφαλαίωση	95

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	97
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	111
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ	121
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	125

Κατάλογος Εικόνων

1.1 Η ηλεκτροστατική γεννήτρια που σχεδίασε ο Francis Hauksbee.	2
1.2 Ο William Crookes και ο σωλήνας Crookes.	3
1.3 Η συσκευή του Hertz.	4
1.4 Ο μονοπολικός σωλήνας κενού του Tesla.	6
1.5 Ο Wilhelm Conrad Röntgen.	8
1.6 Μία από τις πρώτες απεικονίσεις από τον Wilhelm Röntgen.	9
1.7 Μια πρόιμη εικόνα ακτίνων X.	10
1.8 Το εργαστήριο του Wilhelm Röntgen και εξοπλισμός του.	11

Κατάλογος Σχημάτων

2.2.1 Απεικόνιση του ατόμου του Λιθίου κατά το ατομικό πρότυπο του Bohr.	14
2.2.2 Ο Περιοδικός Πίνακας των στοιχείων.	15

Κατάλογος Συντομογραφιών

A.E.I.	Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα
Δ.Ε.	Δευτεροβάθμια Εκπαίδευση
ΔΕΑ	Διαγνωστικά Επίπεδα Αναφοράς
ΕΕ	Ευρωπαϊκή Ένωση
ΕΕΑΕ	Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας
ΕΥΡΑΤΟΜ	Ευρωπαϊκή Κοινότητα Ατομικής Ενέργειας
N.I.M.T.Σ	Νοσηλευτικό Ίδρυμα Μετοχικού Ταμείου Στρατού
Ο.Η.Ε	Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών
Π.Α.	Παράρτημα
Π.Γ.Ν.Α.	Πανεπιστημιακό Γενικό Νοσοκομείο Αθηνών
T.E.I.	Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα
ALARA	As Low As Reasonably Achievable
BSS	International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation
DNA	Deoxyribonucleic Acid
EURATOM - Euratom	European Atomic Energy Community
HVL	Half Value Layer
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission on Radiological Protection
MRI	Magnetic Resonance Imaging
NCRP	National Council on Radiation Protection and Measurements
RNA	Ribonucleic Acid
S. I.	Le Système International d' unités
TLDs	Thermoluminescence Dosimeters
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
US	Ultrasound

Πρόλογος

Κατά τη διάρκεια του 19^{ου} και του 20^{ου} αιώνα σημειώθηκαν σημαντικές ανακαλύψεις στον τομέα των επιστημών της υγείας όπως νέες εφαρμογές σε διαγνωστικό και σε θεραπευτικό επίπεδο. Στη σύγχρονη εποχή που διανύουμε, η θωράκιση της δημόσιας υγείας αποτελεί ζήτημα μείζονος σημασίας. Στην ιατρική χρησιμοποιούνται ευρέως οι ακτίνες α , β και γ με σκοπό τη διάγνωση ή τη θεραπεία μιας νόσου. Εντούτοις, οι ionτίζουσες ακτινοβολίες δύνανται να προκαλέσουν βλαπτικές επιδράσεις σε βιολογικό επίπεδο γι' αυτό κρίνεται αναγκαία η εφαρμογή της ακτινοπροστασίας.

Με τον όρο ακτινοπροστασία εννοούμε το σύνολο των μέτρων και ελέγχων για την ανίχνευση και τον περιορισμό των παραγόντων εκείνων οι οποίοι κατά τη διάρκεια μιας οποιασδήποτε πρακτικής, έργου ή δραστηριότητας με ionτίζουσες ακτινοβολίες, ή επέμβασης σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης ή σαν επακόλουθο μιας κατάστασης έκτακτης ανάγκης ή/και παρελθούσας πρακτικής, ενδέχεται να αποτελέσουν κίνδυνο έκθεσης για τους λειτουργούς υγείας.

Το άτομο το οποίο αποτελεί τη μικρότερη μονάδα ύλης που έχει τις χαρακτηριστικές ιδιότητες ενός χημικού στοιχείου, αποτελείται από το θετικά φορτισμένο πυρήνα και τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια που περιφέρονται γύρω από αυτόν. Ο πυρήνας συνίσταται από πρωτόνια με θετικό φορτίο και νετρόνια που είναι ουδέτερα. Τα πρωτόνια έχουν ίσο κι αντίθετο φορτίο με τα ηλεκτρόνια. Το άτομο είναι ηλεκτρικά ουδέτερο διότι το πλήθος πρωτονίων του είναι ίσο με το πλήθος και ηλεκτρονίων του και ως εκ τούτου τα ηλεκτρικά φορτία τους αλληλοεξουδετερώνονται.

Αν η ενέργεια που προσφέρεται στο άτομο είναι ικανή να απομακρύνει τελείως ένα ηλεκτρόνιο από αυτό, τότε το άτομο θα έχει ένα ηλεκτρόνιο λιγότερο και θα εμφανίσει θετικό φορτίο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ionτισμός. Τη θέση του ηλεκτρονίου που απομακρύνθηκε την καταλαμβάνει άλλο από υψηλότερη στοιβάδα με αποτέλεσμα την εκπομπή ακτινοβολίας.

Οι ακτινοβολίες ανάλογα με το αν προκαλούν ionτισμό (ionτισμό) ή όχι στην ύλη ή σε βιολογικό ιστό διακρίνονται σε ionτίζουσες και μη ionτίζουσες αντίστοιχα. Αν η ενέργεια της ακτινοβολίας είναι ικανή να αφαιρέσει ηλεκτρόνια από το άτομο του υλικού τότε είναι ionτίζουσα. Η ενέργεια και ο τρόπος αλληλεπίδρασης είναι οι παράγοντες που κατατάσσουν τις ακτινοβολίες σε ionτίζουσες και μη. Ο ionτισμός διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη φυσική των ακτινοβολιών καθώς και στις συνέπειές τους στο ανθρώπινο σώμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

1.1 Εισαγωγή

Στα τέλη του 19^{ου} αιώνα ο Wilhelm Conrad Röntgen, Γερμανός φυσικός, ανακάλυψε τις ακτίνες X προκαλώντας την επανάσταση στη διαγνωστική ιατρική. Μολονότι ο 19^{ος} αιώνας αποτέλεσε την αποκορύφωση για τις φυσικές επιστήμες, κρίνεται αναγκαίο να αναφερθούμε και σε προγενέστερες χρονολογίες όπου υπήρξαν ανακαλύψεις οι οποίες αργότερα χρησιμοποιήθηκαν και συνετέλεσαν στο θαύμα αυτό της ιατρικής.

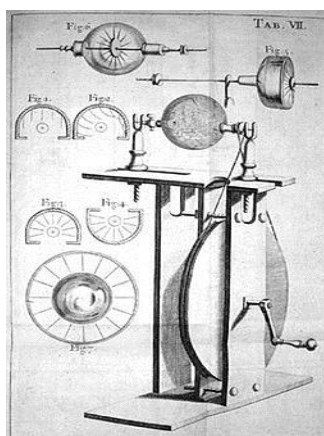
Ειδικότερα θα πρέπει να παρατεθούν οι σχετιζόμενες με το θέμα έρευνες που πραγματοποιήθηκαν πριν και κατά τη διάρκεια του 19^{ου} αιώνα και αφορούν τον μαγνητισμό, τον ηλεκτρισμό, τα αέρια και τα φαινόμενα «εν κενώ».

Εκατοντάδες σωλήνες κενού χρησιμοποιήθηκαν παράγοντας ακτίνες X πολύ νωρίτερα από το Röntgen, ο οποίος το 1895, παρατήρησε τα αποτελέσματά τους εκτός των σωλήνων που οδήγησαν σε αξιοσημείωτες εφαρμογές στην ιατρική, στη βιομηχανία και στην αστρονομία.

1.2 Οι πρόδρομοι του Röntgen

Ο William Gilbert ήταν Άγγλος γιατρός και φυσικός. Υπήρξε μέλος του Κολεγίου του Αγίου Ιωάννη στο Cambridge και γιατρός στην αυλή της βασίλισσας Ελισάβετ Γ'. Το 1600 κυκλοφόρησε το βιβλίο του Περί μαγνητών (De Magnete) το οποίο τον καθιέρωσε ως φυσικό. Ο Gilbert διατύπωσε πρώτος την υπόθεση ότι η Γη είναι ένας σφαιρικός μαγνήτης και αφού μαγνήτισε μία σιδερένια σφαίρα, απέδειξε ότι αυτή επιδρά πάνω στη μαγνητική βελόνα με τον ίδιο τρόπο όπως η Γη. Έδειξε επίσης ότι αν μία μαγνητική βελόνα μπορεί να περιστρέφεται ελεύθερα γύρω από οριζόντιο άξονα που περνάει από το κέντρο βάρους της, σχηματίζει, όταν ισορροπεί, μία γωνία με το οριζόντιο επίπεδο (μαγνητική έγκλιση). Επιπρόσθετα, διέκρινε τα σώματα σε μονωτές και αγωγούς και κατασκεύασε το πρώτο ηλεκτροσκόπιο. Υποστήριξε τις μελέτες του Κοπέρνικου και πίστευε ότι τα αστέρια βρίσκονται σε ποικίλες και τεράστιες αποστάσεις από τη Γη. Διατύπωσε, τέλος, την υπόθεση ότι αυτό που κρατά τους πλανήτες στην τροχιά τους θα έπρεπε να αποτελεί κάποια μορφή μαγνητικής έλξης.

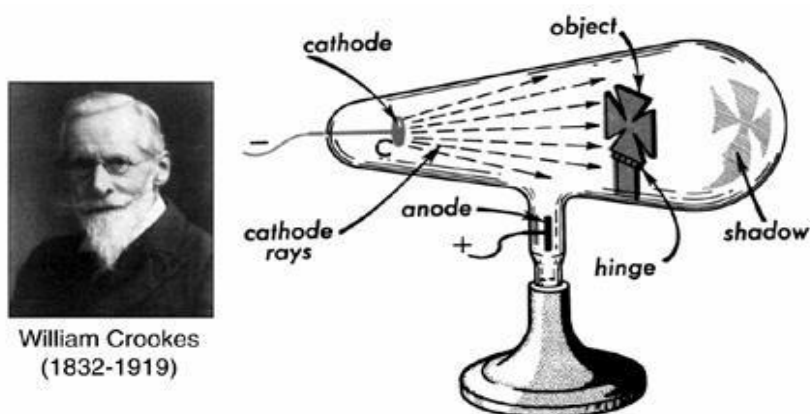
Τα πειράματα του Άγγλου επιστήμονα Francis Hauksbee για την ηλεκτροφωταύγεια είναι γνωστά στους ιστορικούς της φυσικής του 18^{ου} αιώνα. Το 1705 ο Hauksbee δημιούργησε μια ηλεκτροστατική γεννήτρια αποτελούμενη από μια γυάλινη σφαίρα η οποία μπορούσε να περιστραφεί ταχέως από ένα μεγάλο τροχό με μανιβέλα, καθιστώντας δυνατή τη δημιουργία ηλεκτρικού φορτίου με το τρίψιμο της γυάλινης σφαίρας με βαμβακερό ύφασμα ή με το χέρι. Καθώς γυρνούσε τον τροχό με το ένα χέρι, ο Hauksbee τοποθέτησε το άλλο του χέρι πάνω στην περιστρεφόμενη σφαίρα (από την οποία είχε προηγουμένως αντλήσει όλο τον αέρα και είχε προσθέσει υδράργυρο). Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η σφαίρα να παράγει ένα φως που εξέπληξε τους ανθρώπους, οι οποίοι είχαν συνηθίσει να διαβάζουν υπό το φως των κεριών ή των λαμπτήρων πετρελαίου. Ο Hauksbee συνέχισε να πειραματίζεται με τον ηλεκτρισμό κάνοντας πολλές παρατηρήσεις και αναπτύσσοντας μηχανές για να παράγει και να επιδείξει διάφορα ηλεκτρικά φαινόμενα.



Εικόνα 1.1. Η ηλεκτροστατική γεννήτρια που σχεδίασε ο Francis Hauksbee. Πηγή από: “Physico-Mechanical Experiments” (1719), 2nd edition, Λονδίνο.

Το 1785 ο William Morgan, ιατρός, φυσικός και στατιστολόγος όντας μέλος της Βασιλικής Εταιρείας του Λονδίνου, γνωστοποίησε σε αυτήν ένα έγγραφο στο οποίο περιέγραφε πειράματα που εκτέλεσε σχετικά με τα φαινόμενα που παράγονται από τη διέλευση των ηλεκτρικών εκκενώσεων μέσα σε ένα γυάλινο σωλήνα. Βρήκε ότι όταν δεν υπήρχε αέρας στο σωλήνα δεν μπορούσε να διέλθει ηλεκτρική εκκένωση, αλλά όταν εισήγαγε μια πολύ μικρή ποσότητα αέρα, το γυαλί έλαμπε με ένα πράσινο χρώμα. Ο Morgan δεν το γνώριζε, αλλά είχε παράγει ακτίνες X και η απλή του συσκευή ήταν ο πρώτος σωλήνας ακτίνων X.

Το 1879 ο Άγγλος φυσικός και χημικός William Crookes εφηύρε έναν πρώιμο πειραματικό ηλεκτρικό σωλήνα εκκενώσεως (σωλήνας Crookes) με τη χρήση του οποίου ανακάλυψε τις ακτίνες καθόδου. Ο σωλήνας Crookes αποτελούταν από ένα μερικώς εκκενωμένο γυάλινο βολβό διαφόρων σχημάτων, με δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια την κάθοδο (αρνητικό ηλεκτρόδιο) και την άνοδο (θετικό ηλεκτρόδιο), ένα σε κάθε άκρο. Όταν ο Crookes εφάρμοζε υψηλή τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων υπήρχε μια λάμψη (φθορίζον φως) μέσα στο γυάλινο βολβό. Αυτό το φθορίζον φως το ονόμασε «ακτίνες καθόδου» διότι φαινόταν ότι εκπεμπόταν από την κάθοδο (αρνητικό ηλεκτρόδιο). Ωστόσο στις μέρες μας είναι πλέον γνωστό ότι αυτή η λάμψη οφείλεται στην αλληλεπίδραση των ηλεκτρονίων τα οποία κινούνται από την κάθοδο προς την άνοδο.



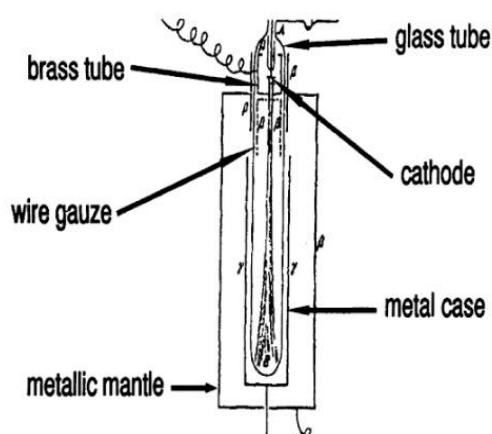
Εικόνα 1.2 Αριστερά: ο William Crookes. Δεξιά: ο σωλήνας Crookes: Τα ηλεκτρόνια κινούνται σε ευθείες γραμμές από την κάθοδο (αριστερά), όπως φαίνεται από τη σκιά που ρίχνεται από το μεταλλικό σταυρό της Μάλτας στον φθορισμό του δεξιού τοίχου του σωλήνα. Η άνοδος είναι το ηλεκτρόδιο στο κάτω μέρος. Πηγή από: “Crookes and advice”(2018).

Το 1892, ο Γερμανός φυσικός Heinrich Hertz, σχεδίασε μια νέα συσκευή η οποία αντιγράφηκε πιο πολύ από όλες τις προϋπάρχουσες. Όπως και τα περισσότερα καινούρια εργαλεία στην πειραματική επιστήμη, η συσκευή του Hertz έπρεπε να δημιουργηθεί και να χρησιμοποιηθεί με διάφορους τρόπους προκειμένου να παράγει τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα.

Η συσκευή που κατασκευάστηκε από τον Hertz συνίστατο στα εξής δομικά στοιχεία: ένα γυάλινο σωλήνα που περιείχε την κάθοδο και την άνοδο, μια μεταλλική θήκη που περιβάλλει το τμήμα του σωλήνα και ένα μεταλλικό φύλλο (μανδύας) με μια τρύπα μέσα του για την εισαγωγή του σωλήνα. Η μεταλλική θήκη και το γειωμένο μεταλλικό φύλλο συνδέονταν με τους πόλους ενός ηλεκτόμετρου που μετρούσε το δυναμικό της θήκης.¹ Η συσκευή συνδεόταν με ένα επαγωγικό πηνίο.²

Ο Hertz δημιούργησε μια ασυνήθιστη συσκευή στην οποία η άνοδος είναι διάτρητος κύλινδρος ορείχαλκου που περιβάλλει την κάθοδο που βρίσκεται στον άξονα και στοχεύει στη διάτρηση. Ακριβέστερα, το μέρος της ανόδου βρισκόταν μέσα στον εκκενωμένο γυάλινο σωλήνα και ήταν σε μεταλλική σύνδεση με έναν κύλινδρο από σύρμα και γάζα.

Με την εκκίνηση της λειτουργίας του πηνίου, το ρεύμα των ακτίνων κινήθηκε κάθετα προς τη διάτρηση διαπερνώντας το μεταλλικό φύλλο. Ως εκ τούτου, ο Hertz απέδειξε ότι οι ακτίνες μπορούν να διεισδύσουν σε πολύ λεπτά μεταλλικά φύλλα.



Εικόνα 1.3 Η συσκευή του Hertz. Πηγή από: The Creation of Scientific Effects: Heinrich Hertz and Electric Waves (1994), The University of Chicago Press.

¹Το ηλεκτόμετρο είναι ένα όργανο που μετρά τη διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού μεταξύ δύο σημείων (ηλεκτρική τάση). Ο Alessandro Volta, Ιταλός Φυσικός, εφηύρε το ηλεκτόμετρο, όπως και την πρώτη πηγή συνεχούς ρεύματος με ηλεκτρόδια από χρυσό και ψευδάργυρο και ηλεκτρολύτη θειικό οξύ, την ηλεκτρική μπαταρία (1800).

Πηγή από: <https://www.britannica.com/biography/Alessandro-Volta>.

²Το πηνίο αποτελεί ένα από τα κύρια εξαρτήματα των ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Πρόκειται για ένα συμμάτινο τύλιγμα που έχει την ιδιότητα να αναπτύσσει μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του όταν διαρρέεται από ρεύμα. Το επαγωγικό πηνίο είναι μια ειδική διάταξη που χρησιμοποιείται για την παραγωγή πολύ υψηλών τάσεων βραχείας διάρκειας με την εκμετάλλευση του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Συνίσταται από έναν πυρήνα μαλακού σιδήρου στον οποίο είναι τυλιγμένο σπειροειδώς ένα σύρμα (πρωτεύον κύκλωμα), ενώ εξωτερικά του πρωτεύοντος κυκλώματος είναι τυλιγμένο ένα λεπτό σύρμα σε πολλές σπείρες (δευτερεύον κύκλωμα). Τα άκρα του πρωτεύοντος κυκλώματος βρίσκονται στους ακροδέκτες του οργάνου.

Πηγή από: http://www.physics.ntua.gr/~dris/FYS_B_LYK.PDF/C_FYBL171-.pdf

Εν συνεχεία ο Hertz πρότεινε στον Αυστριακό φυσικό και βοηθό του στο Πανεπιστήμιο της Βόννης, Philipp Lenard να προχωρήσει στη διάσπαση του σωλήνα σε δύο χώρους, μέσω μιας λεπτής πλάκας αλουμινίου. Στον ένα χώρο οι ακτίνες καθόδου θα είχαν παραχθεί με τον συνηθισμένο τρόπο και στον άλλον θα μπορούσε κανείς να τις παρατηρήσει σε καθαρή κατάσταση, κάτι το οποίο δεν είχε ξανασυμβεί. Έτσι, ο Lenard σχεδίασε μικρά μεταλλικά παράθυρα στο γυαλί με πάχος τέτοιο ώστε τα παράθυρα να είναι σε θέση να αντέξουν τις διαφορές πίεσης και ταυτόχρονα να επιτρέπουν τη διέλευση των ακτίνων. Τα παράθυρα αυτά ονομάστηκαν «παράθυρα του Lenard» και ο σωλήνας στη νέα του μορφή καλούνταν «σωλήνας Lenard».

Το 1894 μετά από πολλά πειράματα με φύλλα αλουμινίου διαφορετικού πάχους ο Lenard ήταν σε θέση να δημοσιεύσει τη μεγάλη του ανακάλυψη: η πλάκα του χαλαζία που είχε μέχρι τότε χρησιμοποιηθεί για το κλείσιμο του σωλήνα εκκένωσης θα μπορούσε να αντικατασταθεί από μια πολύ λεπτή πλάκα αλουμινίου η μπορούσε να διατηρήσει το κενό στο εσωτερικό του σωλήνα αλλά και να επιτρέψει στις ακτίνες καθόδου να διέλθουν από το σωλήνα. Έτσι κατέστη δυνατή η μελέτη των ακτίνων καθόδου καθώς και του φθορισμού που προκάλεσαν εκτός του σωλήνα εκκένωσης και ο Lenard κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι ακτίνες καθόδου διαδόθηκαν μέσω του αέρα σε απόσταση της τάξεως ενός δεκάμετρου χωρίς να εξασθενίσουν. Το 1905 βραβεύτηκε με το βραβείο Νόμπελ Φυσικής για τις εργασίες του επί των καθοδικών ακτίνων και την ανακάλυψη πολλών από τις ιδιότητές τους.

Ο Nikola Tesla, Σέρβος (ή, κατ' άλλους Κροάτης) ηλεκτρολόγος μηχανικός, μηχανολόγος και εφευρέτης το 1894, ορμώμενος από την παρατήρηση μιας μυστηριώδους βλάβης σε φωτογραφικές πλάκες στο εργαστήριό του, άρχισε να διερευνά τις ακτίνες X (εκείνη την εποχή ήταν ακόμα άγνωστες και ανώνυμες). Εκτός από το σωλήνα Crookes που χρησιμοποίησε σε πειράματά του, εφηύρε και ο ίδιος ένα σωλήνα με κενό αέρος που αποτελούνταν από ένα μόνο ηλεκτρόδιο το οποίο εξέπεμπε ηλεκτρόνια, δεν υπήρχε δηλαδή το ηλεκτρόδιο στόχου. Επομένως, τα ηλεκτρόνια επιταχύνθηκαν από τις κορυφές του ηλεκτρικού πεδίου.

Ακόμη και τότε, ο Tesla συνειδητοποίησε ότι η πηγή των ακτίνων X ήταν η θέση της πρώτης πρόσκρουσης του "καθοδικού ρεύματος" μέσα στον βολβό, που ήταν είτε η άνοδος σε ένα διπολικό σωλήνα, είτε το γυάλινο τοίχωμα στον μονοπολικό σωλήνα που εφευρέθηκε.

Σήμερα αυτή η μορφή ακτινοβολίας είναι γνωστή ως ακτινοβολία πέδησης. Επιπρόσθετα, διαπίστωσε ότι το καθοδικό ρεύμα αποτελείται από πολύ μικρά σωματίδια (δηλαδή ηλεκτρόνια). Η ιδέα του ότι οι παραγόμενες ακτίνες ήταν μικρά σωματίδια δεν ήταν καθόλου λανθασμένη. Πολλά χρόνια αργότερα, οι φυσικοί περιγράφουν τις ιδιότητες των σωματιδίων, των κβάντων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που ονομάζονται φωτόνια.



Εικόνα 1.4 Ο μονοπολικός σωλήνας κενού του Tesla. Το σχέδιο απεικονίζει τον μονοπολικό σωλήνα κενού του Tesla, που αποτελείται από έναν γυάλινο βολβό (b), ένα μονό ηλεκτρόδιο (e) και έναν αγωγό εισόδου (c). Ο σωλήνας μπορεί να προσαρμοστεί για χρήση με δύο ηλεκτρόδια τοποθετώντας το δεύτερο ηλεκτρόδιο στα επίπεδα που υποδεικνύονται από τις διακεκομμένες γραμμές. Πηγή από: Nikola Tesla (1896), “Electrical Review”, New York.

1.3 Η ανακάλυψη των ακτίνων X

Τον Οκτώβριο του 1895, ο Γερμανός Φυσικός και καθηγητής Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) , τότε διευθυντής του Φυσικού Ινστιτούτου του Πανεπιστημίου του Wurzburg, αποφάσισε να κάνει μερικά πειράματα με τις καθοδικές ακτίνες. Η λαμπρή εμπειρία του Hertz, του Lenard και άλλων ερευνητών είχε αποκαλύψει πολλά νέα και ενδιαφέροντα φαινόμενα σχετικά με τις ηλεκτρικές εκκενώσεις σε εκκενωμένους σωλήνες, εντούτοις υπήρχαν ανεπίλυτα ζητήματα σε σχέση με αυτές τις εξελίξεις.

Ο Röntgen ήταν πειραματικός φυσικός της παλαιάς σχολής, έχτισε το μεγαλύτερο μέρος του δικού του εξοπλισμού και ως εκ τούτου ήταν απαιτητικός για τη δημιουργία νέου πειραματικού εξοπλισμού. Ο Röntgen ξεκίνησε να εργάζεται σε ένα από τα μικρότερα εργαστήρια του Φυσικού Ινστιτούτου του Πανεπιστημίου χρησιμοποιώντας μια συσκευή η οποία αποτελούταν από ένα πηνίο επαγωγής Ruhmkorff με διακόπτη υδραργύρου και ένα σωλήνα κενού Crookes.³ Ήταν μια απλή συσκευή και όμως προοριζόταν να γίνει το όργανο ανακάλυψης του φαινομένου. Τα δύο ηλεκτρόδια του πηνίου επαγωγής Ruhmkorff συνδέθηκαν με τα ηλεκτρόδια ενός σωλήνα Crookes.

Εν συνεχεία προχώρησε στην επανάληψη σημαντικών πειραμάτων που είχαν πραγματοποιήσει πρωτότερα ερευνητές του ίδιου τομέα. Δεδομένου ότι επαναλάμβανε τα πειράματα του Hertz και του Lenard με τις καθοδικές ακτίνες, ο εξοπλισμός του συνίστατο από το σωλήνα Lenard, τη φθορίζουσα οθόνη και μια φωτογραφική πλάκα.⁴ Ο Röntgen αφότου κάλυψε το σωλήνα Lenard με μαύρο χαρτί (ώστε να προστατεύσει το αλουμίνιο από βλάβες από το ισχυρό ηλεκτροστατικό πεδίο που παρήγαγε τις ακτίνες καθόδου), παρατήρησε το φθορισμό των ακτίνων καθόδου που διέρρευσαν από το παράθυρο αλουμινίου του σωλήνα σε μια οθόνη.

³Ο Heinrich Daniel Ruhmkorff το 1851 παρουσίασε το επαγωγικό πηνίο Ruhmkorff το οποίο κατοχύρωσε με Γαλλικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας. Συνίστατο από μια γεννήτρια που επέτρεπε να παράγει πολύ υψηλές τάσεις, της τάξης των δεκάδων χιλιάδων βολτ από το συνεχές ρεύμα μιας μπαταρίας. Το επαγωγικό πηνίο Ruhmkorff εμπειρίει τρεις καινοτομίες: την αύξηση του μήκους του χρησιμοποιούμενου χάλκινου σύρματος , το διαχωρισμό των πρωτογενών και δευτερογενών κυλίνδρων με ένα γυάλινο μονωτικό σωλήνα και την τοποθέτηση πυκνωτή μεταξύ των επαφών του διακόπτη με σκοπό τη σημαντική μείωση των σπινθήρων. Πηγή από: https://en.wikipedia.org/wiki/Heinrich_Daniel_Ruhmkorff

⁴Ο Röntgen ,όπως και άλλοι πειραματιστές, χρησιμοποιούσε τη φθορίζουσα οθόνη, δηλαδή ένα πέτασμα από λευκοχρυσοκυανιούχο βάριο – BaPt(CN)₄-για την ανίχνευση του φθορισμού που ίσως να προκαλούσαν οι καθοδικές ακτίνες. Πηγή από: <https://physicsg.me/2014/11/08η-ανακάλυψη-των-ακτίνων-γ-από-τον-rontgen/>

Διαισθητικά, έπρεπε να κοιτάζει την ίδια στιγμή για άλλα φαινόμενα ακτινοβολίας διότι κάλυψε κι άλλους εκκενωμένους σωλήνες με μαύρο χαρτί και επέκτεινε τα πειράματά του ώστε να συμπεριλάβει σε αυτά ένα σωλήνα Crookes και εργαζόταν με έναν τέτοιο σωλήνα όταν ανακάλυψε τις ακτίνες X.

Την 8^η Νοεμβρίου του 1895 ενώ ο σωλήνας που παρήγαγε τις καθοδικές ακτίνες ήταν καλυμμένος με μαύρο χαρτί και λειτουργούσε σε ένα σκοτεινό θάλαμο, ο Röntgen παρατήρησε μερικούς φθορίζοντες κρυστάλλους στην οθόνη φθορισμού που βρισκόταν σε κάποια απόσταση από το σωλήνα.

Ο Röntgen ορμώμενος από τις πρώτες παρατηρήσεις του φθορισμού της οθόνης προέβη σε δοκιμές για να προσδιορίσει εάν το φαινόμενο θα μπορούσε ενδεχομένως να προκληθεί από τις καθοδικές ακτίνες. Τοποθέτησε την οθόνη σε μεγαλύτερη απόσταση από το σωλήνα και από το εύρος μέσα στο οποίο οι καθοδικές ακτίνες μπορούσαν να διεισδύσουν. Ωστόσο ο μυστηριώδης φθορισμός εξακολουθούσε να υφίσταται. Επομένως, ήξερε ότι επρόκειτο για καθοδικές ακτίνες μεγάλης διεισδυτικότητας ή ότι ανακάλυψε ένα νέο είδος ακτίνων. Εφόσον διαπίστωσε ότι οι ακτίνες αυτές διέσχισαν μεγάλη απόσταση στον αέρα, προχώρησε ένα βήμα παραπέρα τοποθετώντας υλικά μεγάλης πυκνότητας μεταξύ του σωλήνα Crookes και της φθορίζουσας οθόνης. Πρώτα χρησιμοποίησε ένα βιβλίο και παρατήρησε ότι ο φθορισμός εξακολούθησε να υπάρχει, αφότου οι ακτίνες είχαν περάσει από το βιβλίο, αλλά η έντασή του ήταν κάπως μειωμένη. Ακολούθως, αντικατέστησε το βιβλίο με βαρύτερα υλικά, όπως τα μέταλλα, και διαπίστωσε ότι η ακτινοβολία απορροφούταν σε διάφορους βαθμούς. Μόνο η πλατίνα και ο μόλυβδος μπορούσαν να καταστείλουν τις ακτίνες.

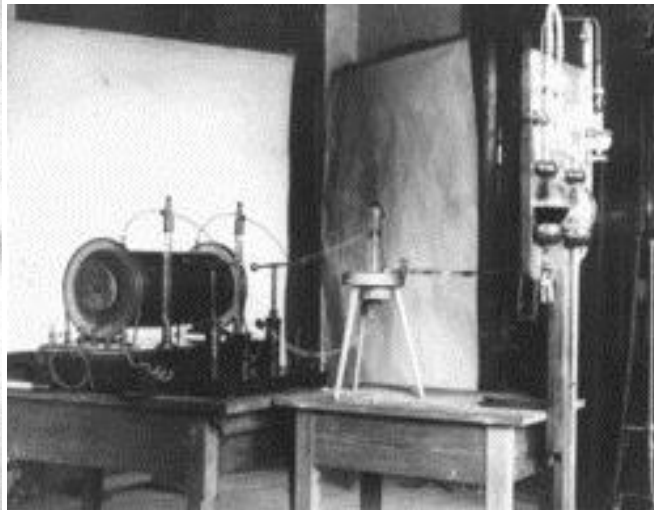
Εικόνα 1.5 Ο Wilhelm Conrad Röntgen
στο εργαστήριό του. Πηγή από: Engineering and
Technology History Wiki.



Κατόπιν, ο Röntgen αντικατέστησε τα απορροφητικά υλικά από το χέρι του και παρατήρησε στην οθόνη τις πυκνότερες σκιές των οστών μέσα στο περίγραμμα της σάρκας. Δεδομένου ότι η φωτογραφική πλάκα ανήκε στον εξοπλισμό για την έρευνα των καθοδικών ακτίνων, ήταν ζήτημα χρόνου η αντικατάσταση της φθορίζουσας οθόνης από την φωτογραφική πλάκα. Με αυτό τον τρόπο, ο Röntgen πραγματοποίησε μια μόνιμη καταγραφή των διαφόρων οπτικών φαινομένων και έπειτα είχε δύο μεθόδους με τις οποίες θα μπορούσε να συνεχίσει πιο ακριβείς μελέτες των επιπτώσεων αυτών των μυστηριωδών ακτίνων.

Η ονομασία του νέου είδους ακτίνων ως «ακτίνες X» προήλθε από το μαθηματικό προσδιορισμό X που συμβολίζει κάτι άγνωστο. Δύο βδομάδες αργότερα από την ανακάλυψή του ο Röntgen απεικόνισε το χέρι της συζύγου του Anna Bertha. Αργότερα απεικόνισε το χέρι του φίλου του Albert von Kölliker. Το 1901 τιμήθηκε με το πρώτο βραβείο Νόμπελ στη Φυσική σε αναγνώριση των εξαιρετικών υπηρεσιών που είχε αποφέρει από την ανακάλυψη των αξιοσημείωτων ακτίνων.

Η ανακάλυψη της ακτινοβολίας X οδήγησε άμεσα σε πρακτικές εφαρμογές στην ιατρική. Στις επόμενες δεκαετίες οι ακτίνες X αποδείχθηκαν ανεκτίμητο εργαλείο για τη διερεύνηση του μικρο-κόσμου του ατόμου και για την ανάπτυξη της κβαντικής θεωρίας της ύλης. Σχεδόν έναν αιώνα αργότερα, σχεδιάστηκαν τηλεσκόπια για την ανίχνευση των ακτίνων X που εκπέμπονται από ουράνια σώματα και είναι απαραίτητες για την κατανόηση της δομής και της εξέλιξης του μακρο-κόσμου των αστεριών, των γαλαξιών και του σύμπαντος στο σύνολό του.



Εικόνα 1.7 Αριστερά: μια πρώιμη εικόνα ακτίνων X του αριστερού χεριού του Albert von Kölliker που τραβήχτηκε σε δημόσια διάλεξη από τον Wilhelm Röntgen. Πηγή από: Wikipedia.

Εικόνα 1.8 Δεξιά: το εργαστήριο του Wilhelm Röntgen και εξοπλισμός του. Πηγή από: ISHRAD (International Society for the History of Radiology) ~~Εικόνα 1.8 Δεξιά: το εργαστήριο του Wilhelm Röntgen και εξοπλισμός του. Πηγή από: ISHRAD (International Society for the History of Radiology) κόνισεις από τον Wilhelm Röntgen, το χέρι της συζύγου του Anna Bertha. Πηγή από: Wikipedia.~~

1.4 Ανακεφαλαίωση

Το θεμελιώδες έργο των προκατόχων του Röntgen έχει

βρει μια σημαντική θέση σε πολλά βιβλία και έγγραφα. Οι ιστορικές εξελίξεις δείχνουν ότι η ανακάλυψη των ακτίνων X από το Röntgen αποτέλεσε το ένδοξο φινάλε. Όλοι αυτοί οι σημαντικοί επιστήμονες συνεισέφεραν στην ανάπτυξη της γνώσης των ιδιοτήτων του ηλεκτρισμού και των μεθόδων παραγωγής του, ξεκινώντας από τη δημιουργία ρευμάτων υψηλής τάσης και συνεχίζοντας στη μελέτη των διαφόρων επιδράσεων σε σωλήνες υψηλής εκκενώσεως.

Ο τρόπος με τον οποίο ο Röntgen αντιλήφθηκε τη σημασία της φαινομενικά ασήμαντης επίδρασης ενός άγνωστου φαινομένου και της μεθόδου που χρησιμοποίησε σε σύντομο χρονικό διάστημα, είχε ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση ακριβών γνώσεων σχετικά με τις επιπτώσεις των ακτίνων X και του εξασφάλισε μια θέση ανάμεσα στους σπουδαιότερους επιστήμονες όλων των εποχών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Η ΦΥΣΙΚΗ ΤΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Στη φυσική, η ακτινοβολία είναι η εκπομπή ή η μετάδοση ενέργειας με τη μορφή κυμάτων ή σωματιδίων μέσω ενός μέσου ή μέσω κενών χώρων. Ένα σώμα εκπέμπει ενέργεια η οποία απορροφάται από άλλα σώματα. Η ακτινοβολία μπορεί να θεωρηθεί ως ενέργεια σε κίνηση είτε σε ταχύτητες ίσες με τις ταχύτητα του φωτός στο κενό που είναι $3 \cdot 10^8 \text{m/s}$ (μέτρα το δευτερόλεπτο) ή κατά προσέγγιση 300.000 χιλιόμετρα το δευτερόλεπτο, είτε σε ταχύτητες μικρότερες από εκείνες του φωτός.

Ο πρώτος τύπος ακτινοβολίας αποτελεί το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που περιλαμβάνει: τα μικροκύματα, τα ραδιοκύματα, τις υπέρυθρες και τις υπεριώδεις ακτίνες, την ορατή ακτινοβολία (φως), τις ακτίνες X και γ. Στην κλασική Φυσική, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι η ροή ενέργειας που διαδίδεται στο κενό με ταχύτητα ίση με την ταχύτητα του φωτός ($3 \cdot 10^8$) και μέσα στην ύλη με ταχύτητα λίγο μικρότερη από την ταχύτητα του φωτός, με τη μορφή ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων που συνθέτουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Ο δεύτερος τύπος ακτινοβολίας περιλαμβάνει τη σωματιδιακή ακτινοβολία. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα ηλεκτρόνια, τα πρωτόνια, τα νετρόνια, τα νετρίνα και τα σωματίδια α όταν κινούνται με μεγάλη ταχύτητα. Στη σωματιδιακή ακτινοβολία περιλαμβάνεται και η εκπομπή της αντιύλης.⁵

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε τις αρχές της Φυσικής για τη δομή του ατόμου και τις βασικές του ιδιότητες, το φαινόμενο της διέγερσης, της αποδιέγερσης και του ιονισμού. Εν συνεχεία θα αναλύσουμε τη φύση και την παραγωγή των ακτίνων X, τη δομή και τη σταθερότητα της πυρηνικής ύλης και τη διαδικασία των πυρηνικών διασπάσεων και θα παραθέσουμε τον ορισμό των ραδιοϊσοτόπων και της ραδιενέργειας. Τέλος, θα εξηγήσουμε διεξοδικά την εκθετική απομείωση και τον εκθετικό νόμο των ραδιενεργών διασπάσεων.

⁵Η αντιύλη είναι η μορφή της ύλης που αποτελείται από τα αντισωματίδια των σωματιδίων που συγκροτούν τα συνήθη υλικά. Το πρώτο αντισωματίδιο ανακαλύφθηκε το 1933 και πρόκειται για ένα αντιηλεκτρόνιο που ονομάζεται ποζιτρόνιο. Αν ένα σωματίδιο και ένα αντισωματίδιο, όπως ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο, συγκρουστούν τότε θα εξαϋλωθούν και θα παραχθεί ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Πηγή από: Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής και άλλοι (2010), Μαθήματα Ακτινοπροστασίας για χειριστές ιατρικών μηχανημάτων ιοντιζουσών ακτινοβολιών, ενότητα 2.4.3., σελ. 15.

2.2. Το άτομο

Η πλειονότητα της ύλης αποτελείται από μια συσσωμάτωση μορίων που μπορούν να διαχωριστούν σχετικά εύκολα. Ακολούθως, τα μόρια συνίστανται από άτομα που ενώνονται με χημικούς δεσμούς οι οποίοι είναι πιο δύσκολο να σπάσουν. Το άτομο αποτελεί την μικρότερη μονάδα στην οποία η ύλη μπορεί να χωριστεί χωρίς την απελευθέρωση ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων. Επιπλέον, είναι η μικρότερη μονάδα ύλης που έχει τις χαρακτηριστικές ιδιότητες ενός χημικού στοιχείου. Ως εκ τούτου, το άτομο συνιστά το βασικό δομικό συστατικό κάθε χημικού στοιχείου.

Η θεωρία του Δημόκριτου (400 περίπου π.Χ.) έχει ασκήσει μεγαλύτερη επιρροή σε μεταγενέστερους χρόνους από οποιαδήποτε άλλη ατομική θεωρία αρχαίων Ελλήνων φιλοσόφων. Το αν η θεωρία του είναι χρονολογικά και η παλαιότερη δεν μπορεί να αποδειχθεί με βεβαιότητα. Με την αποδοχή του κενού ο Δημόκριτος εξήγησε όχι μόνο ότι τα άτομα θα μπορούσαν να είναι ξεχωριστά, αλλά και ότι θα μπορούσαν να κινηθούν. Τα άτομα μπορούν να αντιπαρατίθενται, αλλά δεν μπορούν ποτέ να συγχωνευθούν σε ένα νέο σύνολο. Ούτε μπορούν να χωριστούν σε δύο μέρη. Η μόνη πιθανή αλλαγή συνίσταται στη διαφοροποίηση της θέσης των ατόμων με ένωση ή με διαχωρισμό από άλλα άτομα.

Ο Bohr και ο Rutherford κατά τον 19^ο αιώνα διατύπωσαν τις θεωρίες της αρχιτεκτονικής κατασκευής των ατόμων όλων των στοιχείων. Οι δύο φυσικοί, αντιλαμβάνονταν το άτομο, όπως το πλανητικό σύστημα, δηλαδή ως πυρήνα γύρω από τον οποίο μετακινούνται διάφορα ηλεκτρόνια σε διαφορετικές τροχιές. Πιο συγκεκριμένα, οι πλανήτες διατηρούνται στις καθορισμένες τροχιές τους από την ισορροπία μεταξύ της φυγόκεντρης δύναμης της τροχιακής τους κίνησης και της έλξης της βαρύτητας των μαζών, ενώ στο άτομο τα ηλεκτρόνια κινούνται σε καθορισμένες τροχιές λόγω της ελκτικής δύναμης μεταξύ του αρνητικού τους φορτίου και του θετικού φορτίου του πυρήνα.

Ο Bohr προκειμένου να δώσει την απαιτούμενη σταθερότητα στο ατομικό του μοντέλο παραδέχθηκε ορισμένα αξιώματα. Καταρχάς, τα ηλεκτρόνια μπορούν να κινηθούν μόνο σε καθορισμένες τροχιές διαφορετικών ενεργειακών επιπέδων, σε διαφορετικές αποστάσεις από τον πυρήνα. Όσο ένα ηλεκτρόνιο παραμένει στην ίδια τροχιά, δεν εκπέμπει ενέργεια. Κατά δεύτερον, η εκπομπή ενέργειας συμβαίνει μόνο όταν ένα ηλεκτρόνιο μεταπηδά από μια τροχιά σε μια άλλη. Στην περίπτωση αυτή εκπέμπεται ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

2.2.1 Η δομή του ατόμου

Το άτομο δομείται από έναν κενό χώρο ο οποίος καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του και από ένα θετικά φορτισμένο πυρήνα πρωτονίων (με θετικό φορτίο +1) και νετρονίων (ουδέτερα) που περιβάλλεται από ένα ή περισσότερα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια (αρνητικό φορτίο -1). Τα πρωτόνια έχουν ίσο κι αντίθετο ηλεκτρικό φορτίο με τα ηλεκτρόνια.⁶

Το άτομο στο σύνολό του εμφανίζεται ηλεκτρικά ουδέτερο επειδή το πλήθος των πρωτονίων είναι ίσο με το πλήθος των ηλεκτρονίων και κατά συνέπεια τα ηλεκτρικά φορτία τους αλληλοεξουδετερώνονται. Ο πυρήνας είναι μικρός και πυκνός σε σύγκριση με τα ηλεκτρόνια, τα οποία είναι τα ελαφρύτερα φορτισμένα σωματίδια στη φύση. Τα ηλεκτρόνια έχουν τη μικρότερη μάζα, ενώ τα πρωτόνια έχουν μάζα περίπου 1836 φορές και τα νετρόνια περίπου 1838 μεγαλύτερη από αυτήν των ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια έλκονται από οποιαδήποτε θετική φόρτιση από την ηλεκτρική ενός δύναμη. Στο άτομο οι ηλεκτρικές δυνάμεις δεσμεύουν τα ηλεκτρόνια στον πυρήνα.

Κατά το ατομικό πρότυπο του Bohr, όπως προαναφέρθηκε, τα ηλεκτρόνια περιφέρονται σε διακριτές στοιβάδες (κυκλικές τροχιές) γύρω από τον πυρήνα, περίπου όπως οι πλανήτες περιφέρονται γύρω από τον Ήλιο. Οι τροχιές έχουν συγκεκριμένες ακτίνες που καθορίζονται από τον κύριο κβαντικό αριθμό n . Κάθε στοιβάδα μπορεί να περιέχει έναν συγκεκριμένο μέγιστο αριθμό ηλεκτρονίων.

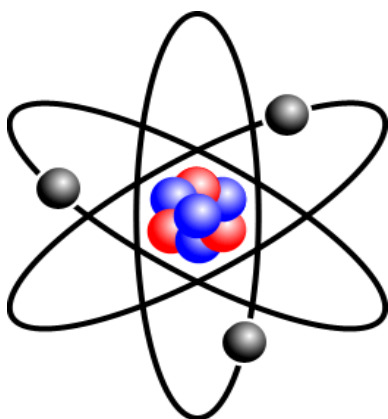
Ωστόσο με την εξέλιξη της Φυσικής (ατομική, κβαντική) το πρότυπο του Bohr εκσυγχρονίστηκε στο κβαντομηχανικό πρότυπο.⁷ Σύμφωνα με το σύγχρονο μοντέλο ατομικής δομής, τα ηλεκτρόνια δεν περιφέρονται σε κυκλικές τροχιές αλλά βρίσκονται σε ηλεκτρονικά νέφη συγκεκριμένων σχημάτων γύρω από τον πυρήνα.

⁶Με τον όρο «ηλεκτρικό φορτίο» εννοούμε μια ιδιότητα ορισμένων υποατομικών σωματιδίων (δηλαδή σωματίδια μικρότερα από το άτομο, ενός το πρωτόνιο, το νετρόνιο και το ηλεκτρόνιο), η οποία καθορίζει ενός μεταξύ ενός ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις. Ένα υλικό σώμα που έχει ηλεκτρικό φορτίο, επηρεάζεται και δημιουργεί ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Υπάρχουν δύο ειδών φορτία: τα θετικά και τα αρνητικά. Το στοιχειώδες αρνητικό φορτίο είναι το ηλεκτρόνιο e και το στοιχειώδες θετικό φορτίο είναι το πρωτόνιο. Δύο ομόσημα φορτία (και τα δύο θετικά ή και τα δύο αρνητικά) απωθούνται μεταξύ ενός. Αντιθέτως, δύο ετερόσημα φορτία (το ένα θετικό και το άλλο αρνητικό) έλκονται μεταξύ ενός. Πηγή από: Κουτρομπής Π. Γεώργιος (2003), Ακτινοφυσική 1: κεφ.1, σελ. 3-4.

⁷Η κβαντική μηχανική (αλλιώς κβαντική φυσική) αποτελεί τη θεμελιωμένη θεωρία της φυσικής που περιγράφει τη συμπεριφορά της ύλης στο μοριακό, ατομικό και υποατομικό επίπεδο. Ο όρος «κβάντο» (*quantum*, προέρχεται από το λατινικό επίθετο *quantus*, στο ουδέτερο γένος: *quantum* που σημαίνει «ποσό») αναφέρεται σε διακριτές μονάδες που χαρακτηρίζουν συγκεκριμένες φυσικές ποσότητες, όπως η ενέργεια ενός ατόμου ύλης σε κατάσταση ηρεμίας. Πηγή από: Davidovits P. (2007), Physics in Biology and Medicine third edition, Complementary Science series, p. 265.

Ορισμένα ηλεκτρονικά νέφη είναι σφαιρικά και άλλα έχουν πιο πολύπλοκα σχήματα. Τα ηλεκτρόνια περιφέρονται γύρω από τον πυρήνα του ατόμου σε ηλεκτρονικά νέφη διακριτών σχημάτων και μεγεθών και βρίσκονται το ένα μέσα στο άλλο κατά ομάδες που ονομάζονται στοιβάδες. Κάποιο ηλεκτρόνιο βρίσκεται στο απλούστερο τροχιακό μέσα στη στοιβάδα που αντιστοιχεί στη χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη, ενώ κάποιο άλλο συναντάται στα πιο πολύπλοκα τροχιακά μέσα στη στοιβάδα που αντιστοιχεί στην υψηλότερη ενεργειακή στάθμη.⁸ Σε όσο υψηλότερη ενεργειακή στάθμη υφίσταται ένα ηλεκτρόνιο, τόσο υψηλότερη ενέργεια έχει.

Στη φύση τα άτομα είναι πάντα ουδέτερα και τα ηλεκτρόνια διατάσσονται έτσι ώστε να βρίσκονται σε στοιβάδες όσο το δυνατόν πλησιέστερες στον πυρήνα. Η ανάγκη των ηλεκτρονίων να βρίσκονται κοντά στον πυρήνα υπαγορεύεται από την αρχή ενός ελάχιστης ενέργειας.⁹ Όσο πιο κοντά στον πυρήνα είναι η στοιβάδα, τόσο μικρότερη ενέργεια διαθέτουν τα ηλεκτρόνια εντός αυτής.



Σχήμα 2.2.1 Απεικόνιση του ατόμου του Λιθίου κατά το ατομικό πρότυπο του Bohr : ο πυρήνας περιέχει 3 πρωτόνια (κόκκινη απόχρωση) και 4 νετρόνια (μπλε απόχρωση) και γύρω από αυτόν περιστρέφονται 3 ηλεκτρόνια (μαύρη απόχρωση). Πηγή από: Wikipedia.

⁸Το «ατομικό τροχιακό» είναι μια έννοια η οποία εισήχθη ενός αρχές του 20^{ου} αιώνα μέσω ενός κβαντικής θεωρίας και προσδιορίζει μια περιοχή του τρισδιάστατου χώρου στην οποία υπάρχει πιθανότητα να βρεθεί το ηλεκτρόνιο ενός ατόμου. Κάθε ηλεκτρόνιο ενός ατόμου βρίσκεται σε ένα ορισμένο τροχιακό. Πηγή από: Κονταρίδης Δημήτρης (2015), Φυσικοχημεία Ι: Ενότητα 8- Ατομικά τροχιακά, σελ.4.

⁹Σύμφωνα με την αρχή ενός ελάχιστης ενέργειας «κατά την ηλεκτρονιακή δόμηση ενός πολυηλεκτρονικού ατόμου, τα ηλεκτρόνια οφείλουν να καταλάβουν τροχιακά με τη μικρότερη ενέργεια, ώστε τα άτομα να αποκτήσουν τη μέγιστη σταθερότητα στη θεμελιώδη κατάσταση». Για τη μέτρηση της ενέργειας σε ατομικό και υποατομικό επίπεδο χρησιμοποιείται το ηλεκτρονιοβόλτ eV. Ο ορισμός του eV είναι η κινητική ενέργεια που αποκτά ένα ηλεκτρόνιο όταν κινείται μεταξύ δύο σημείων με διαφορά δυναμικού ενός (1) Volt (βολτ). Το Volt αποτελεί μονάδα μέτρησης της ηλεκτρικής τάσης. Ανήκει στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (S.I.) και έλαβε το όνομά της προς τιμήν του Ιταλού φυσικού Alessandro Volta. Πηγή από: <https://www.britannica.com/biography/Alessandro-Volta>

2.2.2 Οι βασικές ιδιότητες του ατόμου

Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό ενός ατόμου είναι ο ατομικός του αριθμός (συμβολίζεται με το Z), ο οποίος ορίζεται ως ο αριθμός των μονάδων θετικού φορτίου στον πυρήνα, δηλαδή το πλήθος των πρωτονίων του πυρήνα. Ο πυρήνας του αζώτου παραδείγματος χάριν, περιέχει 7 πρωτόνια ενώ του οξυγόνου 8. Το πλήθος των πρωτονίων (Z) και των νετρονίων του πυρήνα (συμβολίζεται με N) ονομάζεται μαζικός αριθμός και συμβολίζεται με A (επομένως $A=Z+N$).

Ένα ουδέτερο άτομο έχει ίσο αριθμό πρωτονίων και ηλεκτρονίων έτσι ώστε τα θετικά και τα αρνητικά φορτία να ισορροπούν ακριβώς. Δεδομένου ότι τα ηλεκτρόνια καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο ένα άτομο αλληλεπιδρά με ένα άλλο, ο αριθμός των πρωτονίων στον πυρήνα καθορίζει τις χημικές ιδιότητες ενός ατόμου.

Για την ευκολότερη μελέτη τους, τα στοιχεία έχουν ταξινομηθεί σε έναν πίνακα κατά αύξοντα ατομικό αριθμό.¹⁰ Ο πίνακας αυτός ονομάζεται Περιοδικός Πίνακας των στοιχείων.

Periodic Table of the Elements

The periodic table shows elements from Hydrogen (1) to Oganesson (118). It includes the Lanthanide Series (57-71) and Actinide Series (89-103) at the bottom. A legend at the bottom identifies the color-coded groups: Alkali Metal, Alkaline Earth, Transition Metal, Basic Metal, Semimetals, Nonmetals, Halogens, Noble Gas, Lanthanides, and Actinides.

¹⁰ Με τον όρο «στοιχείο» εννοούμε ένα χημικό στοιχείο το οποίο είναι μια χημική ουσία που αποτελείται αποκλειστικά από άτομα με τον ίδιο αριθμό πρωτονίων στους πυρήνες τους, δηλαδή με τον ίδιο ατομικό αριθμό. Για παράδειγμα η χημική ουσία που αποτελείται από μόνο από άτομα με δύο πρωτόνια στους πυρήνες τους είναι ένα χημικό στοιχείο που ονομάζεται ήλιο. Τα χημικά στοιχεία με βάση τις ιδιότητές τους διακρίνονται σε μέταλλα, μεταλλοειδή και αμέταλλα. Τα πιο γνωστά αμέταλλα αποτελούν ο άνθρακας, το υδρογόνο και το οξυγόνο. Το πυρίτιο και το αρσενικό κατατάσσονται στα πιο γνωστά μεταλλοειδή, ενώ το αλουμίνιο, ο σίδηρος, ο χαλκός, ο χρυσός, ο υδράργυρος και ο μόλυβδος ανήκουν στα πιο γνωστά μέταλλα. Πηγή από: Σηπλιόπουλος Ιωακείμ και άλλοι (2015), Χημεία, κεφ. 1, σελ. 28, 29 και 31.

Σχήμα 2.2.2 Ο Περιοδικός Πίνακας των στοιχείων. Πηγή από: Science & Educationblogs.sch.gr..

Στον Περιοδικό Πίνακα στην πάνω αριστερή γωνία κάθε στοιχείου διακρίνεται ο ατομικός του αριθμός Z . Οι κατακόρυφες στήλες (18 στο σύνολο) του πίνακα ονομάζονται «ομάδες» και τα στοιχεία που ανήκουν στην ίδια ομάδα έχουν τον ίδιο αριθμό ηλεκτρονίων (άρα και πρωτονίων) στην εξωτερική τους στοιβάδα και κατά συνέπεια παρουσιάζουν παρόμοιες χημικές ιδιότητες. Οι οριζόντιες γραμμές (7 συνολικά) του πίνακα ονομάζονται «περίοδοι» και τα στοιχεία σε κάθε περίοδο παρουσιάζουν την ίδια μεταβολή διαφόρων φυσικών ιδιοτήτων.

Ο αριθμός των νετρονίων σε έναν πυρήνα επηρεάζει τη μάζα του ατόμου αλλά όχι τις χημικές του ιδιότητες. Ως εκ τούτου, ένας πυρήνας με έξι πρωτόνια και έξι νετρόνια θα έχει τις ίδιες χημικές ιδιότητες με έναν πυρήνα με έξι πρωτόνια και οκτώ νετρόνια, αν και οι δύο μάζες θα είναι διαφορετικές. Τα άτομα που ενώ περιέχουν τον ίδιο αριθμό πρωτονίων στον πυρήνα τους αλλά ο αριθμός των νετρονίων τους διαφέρει, ονομάζονται ισότοπα. Τα άτομα αυτά εμφανίζουν μεταξύ παρόμοιες χημικές αλλά διαφορετικές φυσικές ιδιότητες. Η ονομασία «ισότοπα» προέκυψε από το γεγονός ότι εφόσον τα άτομα αυτά περιέχουν τον ίδιο αριθμό πρωτονίων στον πυρήνα τους, άρα έχουν τον ίδιο ατομικό αριθμό Z , καταλαμβάνουν την ίδια θέση (τόπο) στον Περιοδικό Πίνακα.

2.2.3 Διέγερση, αποδιέγερση και ιονισμός

Αν σε ένα άτομο προσφερθεί ενέργεια με κάποιο τρόπο τότε υπάρχει πιθανότητα κάποιο ηλεκτρόνιο να του την απορροφήσει και να μεταπηδήσει σε στοιβάδα μεγαλύτερης ενέργειας, δηλαδή σε στοιβάδα πιο απομακρυσμένη από τον πυρήνα (με μεγαλύτερη ακτίνα από το κέντρο του πυρήνα). Η μετάβαση ενός ηλεκτρονίου του ατόμου από μια στοιβάδα χαμηλής ενέργειας σε άλλη υψηλότερης ενέργειας ονομάζεται «διέγερση» του ατόμου. Η ενέργεια που απαιτείται για τη διέγερση του ατόμου ονομάζεται «ενέργεια διέγερσης» και το άτομο «διεγερμένο» διότι δε βρίσκεται πλέον στην κατάσταση ελάχιστης ενέργειας (θεμελιώδης κατάσταση) με τα ηλεκτρόνιά του όσο το δυνατόν πλησιέστερα στον πυρήνα.

Ένα ηλεκτρόνιο θα απορροφήσει την ενέργεια που του προσφέρεται εφόσον αυτή είναι ίση με την ενεργειακή διαφορά που χωρίζει τη στοιβάδα του με μια άλλη υψηλότερη. Αν η προσφερόμενη ενέργεια είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη τότε το ηλεκτρόνιο θα την αγνοήσει.

Το διεγερμένο άτομο παραμένει στην κατάσταση διέγερσης για ελάχιστο χρονικό διάστημα (της τάξεως του 10^{-8} s) και επανέρχεται στη θεμελιώδη κατάσταση εκπέμποντας ταυτόχρονα την ενέργεια που απορρόφησε με τη μορφή ακτινοβολίας (φωτόνια).¹¹

Η επάνοδος του ηλεκτρονίου στη θεμελιώδη κατάσταση (στην προηγούμενη στοιβάδα) μπορεί να συμβεί είτε απευθείας με ένα άλμα, οπότε εκπέμπεται ένα φωτόνιο, είτε με περισσότερα διαδοχικά άλματα, οπότε εκπέμπονται τόσα φωτόνια όσα και τα άλματα που πραγματοποιεί. Η επαναφορά του ηλεκτρονίου στη στοιβάδα χαμηλότερης ενέργειας ονομάζεται «αποδιέγερση».

Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία είναι διαφορετική από άτομο σε άτομο και είναι χαρακτηριστική του είδους του ατόμου γι' αυτό το λόγο ονομάζεται «χαρακτηριστική ακτινοβολία». Ανιχνεύοντας τη χαρακτηριστική ακτινοβολία μπορούμε να προσδιορίσουμε το είδος του ατόμου που την εξέπεμψε.

Αν στο άτομο προσφερθεί μεγάλη ποσότητα ενέργειας τότε είναι δυνατόν το ηλεκτρόνιο του να απομακρυνθεί από αυτό, σε περιοχή όπου δεν ασκείται ηλεκτρική δύναμη από τον πυρήνα στο ηλεκτρόνιο. Το αποτέλεσμα είναι το άτομο να γίνει θετικώς φορτισμένο επειδή τα θετικά φορτία των πρωτονίων είναι πλέον περισσότερα. Η απομάκρυνση ενός ηλεκτρονίου του ατόμου σε περιοχή εκτός του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα ονομάζεται «ιονισμός» του ατόμου.

Η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για να απομακρυνθεί το ηλεκτρόνιο του ατόμου από τη θεμελιώδη στοιβάδα σε περιοχή εκτός του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα ονομάζεται «ενέργεια ιονισμού». Τη θέση του ηλεκτρονίου που απομακρύνθηκε την καταλαμβάνει άλλο από υψηλότερη στοιβάδα με αποτέλεσμα την εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας. Το θετικώς φορτισμένο άτομο (ión) και το αρνητικώς φορτισμένο ηλεκτρόνιο αποτελούν ένα ζεύγος íόντων.¹²

¹¹Το φωτόνιο είναι το κβάντο στην κβαντομηχανική και στη φυσική των στοιχειωδών σωματιδίων όταν αυτό αναφέρεται στο φως και στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ως φορέας ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων. Τα φωτόνια συνιστούν τα δομικά συστατικά της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και είναι πακέτα ενέργειας που κινούνται πάντα με την καθολική ταχύτητα του φωτός. Ο όρος «κβάντο» αναφέρεται σε μια αδιάστατη μονάδα ποσότητας. Πηγή από: Κουτρομπής Π. Γεώργιος (2003), Ακτινοφυσική 1, κεφ. 1 (3), σελ. 10-11.

¹²Ως «ión» ορίζεται το άτομο ή το σύνολο των ατόμων που φέρουν ηλεκτρικό φορτίο. Όταν ένα άτομο κάτω από ορισμένες συνθήκες αποκτήσει ένα ηλεκτρόνιο, τότε αποτελεί íόν με αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο. Αντιθέτως, όταν ένα άτομο χάσει ένα ηλεκτρόνιο, μετατρέπεται σε κατίον με θετικό ηλεκτρικό φορτίο. Πηγή από: Κουτρομπής Π. Γεώργιος (2003), Ακτινοφυσική 1: κεφ. 1(Γενικά), σελ. 3-4.

2.3 Η φύση και η παραγωγή των ακτίνων X

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι η εκπομπή στο χώρο ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας υπό μορφή κυμάτων που ονομάζονται ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Ανάλογα με τη συχνότητα των κυμάτων της κι αντίστοιχα την ενέργεια που μεταφέρει η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία διακρίνεται σε περιοχές οι οποίες, όπως προαναφέρθηκε, είναι: τα μικροκύματα, τα ραδιοκύματα, οι υπέρυθρες και υπεριώδεις ακτινοβολίες, το ορατό φως και οι ακτίνες X και γ.¹³

Το εύρος της περιοχής των συχνοτήτων που καλύπτουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα καλείται ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και εκτείνεται θεωρητικά από σχεδόν μηδενικές συχνότητες ως το άπειρο. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα με βάση ορισμένες χαρακτηριστικές ιδιότητες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (μήκος κύματος, συχνότητα και ενέργεια φωτονίων) χωρίζεται σε επιμέρους ζώνες.¹⁴

Οι ακτίνες X αποτελούν ένα τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος με περιοχή μήκους κύματος μεταξύ 10 nm με 10 pm, περίπου 10^4 φορές μικρότερο από το μήκος κύματος της ορατής ακτινοβολίας (φως). Η αντίστοιχη περιοχή συχνότητας των ακτίνων X κυμαίνεται από 30 PHz - 30 EHz και η περιοχή ενέργειας από 120 eV - 120keV. Αυτό το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος βρίσκεται μεταξύ των τμημάτων της υπεριώδους ακτινοβολίας και των ακτίνων γ.

¹³Με τον όρο «συχνότητα» εννοούμε τον αριθμό επαναλήψεων ενός γεγονότος στη μονάδα του χρόνου. Η συχνότητα χαρακτηρίζει οποιοδήποτε φυσικό μέγεθος μεταβάλλεται περιοδικά εκφράζοντας περιοδικές κινήσεις. Η περιοδική κίνηση λέγεται η κίνηση εκείνη η οποία επαναλαμβάνεται αυτούσια ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Στην περιοδική κίνηση μεταβάλλεται περιοδικά η θέση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση του αντικειμένου. Στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταβάλλεται περιοδικά η τιμή του ηλεκτρικού ή του μαγνητικού πεδίου τους για συγκεκριμένη θέση ή χρονική στιγμή. Η μονάδα μέτρησης της συχνότητας οποιοδήποτε σύντομου περιοδικού φαινομένου είναι το Hertz και συμβολίζεται διεθνώς με τα λατινικά γράμματα Hz. Το Hz αφορά την περίοδο ενός δευτερολέπτου, δηλαδή συχνότητα ενός Hz σημαίνει πως το φαινόμενο που μελετάμε συμβαίνει μια φορά το δευτερόλεπτο. Το όνομα της μονάδας αυτής οφείλεται στον Γερμανό φυσικό Heinrich Hertz ο οποίος εργάστηκε πάνω στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Πηγή από: Buchwald Z. Jed (1994), The Creation of Scientific Effects: Heinrich Hertz and Electric Waves: part one p.7-8.

¹⁴Ο όρος «κύμα» (από το αρχαίο ελληνικό ρήμα «κύω» που σημαίνει φουσκώνομαι) αναφέρεται σε μια διαταραχή που μεταδίδεται στο χώρο και στο χρόνο. Χαρακτηρίζει τη μεταφορά της διαταραχής συνήθως διαμέσου ενός μέσου. Η μεταφορά αυτή συμβαίνει στα υλικά μέσα ως παλμική κίνηση μεταξύ των στοιχειωδών σωματιδίων του μέσου. Ωστόσο, κάποια είδη κυμάτων όπως τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μπορούν να διαδίδονται στο κενό. Σε ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα η διαταραχή αφορά την ένταση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου. Ως «μήκος κύματος» χαρακτηρίζεται η απόσταση μεταξύ των αντίστοιχων σημείων δύο διαδοχικών κυμάτων. Το μήκος κύματος συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα «λ» και αποτελεί την απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών κορυφών ή κοιλάδων ενός κύματος. Πηγή από: Davidovits P.(2007), Physics in Biology and Medicine third edition, Complementary Science series, p. 162- 164.

Οι ακτίνες X διαχωρίζονται σε δύο υποπεριοχές μήκους κύματος, συχνότητας και ενέργειας: στις σκληρές ακτίνες X (100 pm–10 pm, 30 Hz - 30 THz, 12keV – 120 keV) και στις μαλακές ακτίνες X (10 nm – 100 pm, 30 PHz – 3 THz, 120 eV – 12 keV).

Οι ακτίνες X και γ , τα σωμάτια α και β , τα ηλεκτρόνια, τα πρωτόνια και τα νετρόνια είναι «ιοντίζουσες ακτινοβολίες». Η ιοντίζουσα ακτινοβολία έχει ενέργεια ικανή ώστε να προκαλέσει βίαιη απόσπαση των ηλεκτρονίων από τα άτομα τα οποία αντιδρώντας μεταξύ τους δημιουργούν ιόντα (ιονισμός). Αντιθέτως, τα ραδιοκύματα και γενικά οι ακτινοβολίες χαμηλής ενέργειας (υπεριώδεις) δεν μπορούν να προκαλέσουν ιονισμό άρα είναι «μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες». Ωστόσο, οι μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες είναι ικανές να επιφέρουν μόνο θερμικά αποτελέσματα λόγω των ταλαντώσεων που προκαλούν στα μόρια της ύλης.

Στη θεωρία του κλασσικού ηλεκτρομαγνητισμού, οι ακτίνες X παράγονται όταν ηλεκτρόνια μεγάλης ταχύτητας, που έχουν επιταχυνθεί από υψηλή τάση, προσπίπτουν σε μεταλλικό στόχο (σωλήνας ακτίνων X).^{15,16} Οι αλληλεπιδράσεις των ηλεκτρονίων με ένα υλικό είναι δύο τύπων: η σύγκρουση και η πέδηση. Κάθε ηλεκτρόνιο υφίσταται συγκρούσεις πριν χάσει όλη του την ενέργεια. Σε κάθε σύγκρουση αλλάζει η διεύθυνση της κίνησής του. Στο φαινόμενο της σύγκρουσης τον κύριο ρόλο διαδραματίζουν τα εξωτερικά ηλεκτρόνια του ατόμου, ενώ στο φαινόμενο της πέδησης, ο πυρήνας του ατόμου.

¹⁵ Η θεωρία του κλασσικού ηλεκτρομαγνητισμού καταδεικνύει ότι ο ηλεκτρισμός, ο μαγνητισμός και το φως είναι όλα εκδηλώσεις του ίδιου φαινομένου, του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Η θεωρία αυτή είναι αποτέλεσμα παρατηρήσεων, πειραμάτων και εξισώσεων του James Clerk Maxwell, ο οποίος απέδειξε ότι το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο ταξιδεύουν στο χώρο σε μορφή κυμάτων με την ταχύτητα του φωτός με την έκδοση της Δυναμικής θεωρίας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου (1865). Πηγή από: physics4u ο Μάξγουελ-και-οι-εξισώσεις-του

¹⁶ Ένας σωλήνας ακτίνων X είναι ένας σωλήνας κενού που μετατρέπει την ηλεκτρική ισχύ εισόδου σε ακτίνες X. Είναι μια ελεγχόμενη πηγή ακτίνων X που χρησιμοποιείται ευρέως σε ακτινολογικά μηχανήματα, αξονικούς τομογράφους, σαρωτές αποσκευών αεροδρομίου, ανάλυση υλικών και δομών και για βιομηχανική επιθεώρηση. Σε αντίθεση με άλλες πηγές ιοντίζουσας ακτινοβολίας οι ακτίνες X παράγονται μόνο εφόσον ο σωλήνας ακτίνων X ενεργοποιείται. Οι σωλήνες ακτίνων X αποτελούν την εξέλιξη των πειραματικών σωλήνων Crookes με τους οποίους ανακαλύφθηκαν οι ακτίνες X το 1895 από τον Wilhelm Conrad Röntgen. Πηγή από: Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής και άλλοι (2010), Μαθήματα Ακτινοπροστασίας για χειριστές ιατρικών μηχανημάτων ιοντίζουσών ακτινοβολιών: ενότητα 2.5 , σελ.16-17.

Η σύγκρουση αποτελεί μια αλληλεπίδραση μεταξύ ενός προσπίπτοντος ηλεκτρονίου που ονομάζεται «βλήμα» κι ενός ηλεκτρονίου του υλικού που λέγεται «στόχος». Τα ηλεκτρόνια αυτά αλληλεπιδρούν με μια απωστική ηλεκτροστατική δύναμη διότι είναι και τα δύο αρνητικά φορτισμένα σωματίδια.¹⁷ Η ηλεκτροστατική δύναμη εφαρμόζεται σε όλη τη διάρκεια της διαδρομής του «βλήματος» και το μέτρο της έντασής της εξαρτάται από την εκάστοτε απόσταση από το «στόχο».

Πολλές φορές οι συγκρούσεις των «βλημάτων» με εξωτερικά ηλεκτρόνια «στόχους» έχουν ως αποτέλεσμα τα τελευταία να εγκαταλείψουν το άτομο και να έχουν αρκετή ενέργεια ώστε να δημιουργήσουν ιονισμούς ή διεγέρσεις άλλων ατόμων. Τα συγκεκριμένα ηλεκτρόνια ονομάζονται «ακτίνες δέλτα». Ωστόσο υπάρχει περίπτωση ένα ηλεκτρόνιο να χάσει όλη του την ενέργεια χωρίς να προκαλέσει ακτινοβολία. Επιπρόσθετα, μπορεί ένα ηλεκτρόνιο χτυπώντας ένα στόχο να υποστεί απώλειες ενέργειας και στο τέλος να βγει έξω από το στόχο προς τα πίσω. Το ηλεκτρόνιο αυτό λέγεται οπισθοσκεδαζόμενο.

Το φαινόμενο της πέδησης αποτελεί μια αλληλεπίδραση μεταξύ ενός προσπίπτοντος ηλεκτρονίου και του πυρήνα του ατόμου του στόχου. Όταν ένα ηλεκτρόνιο περνά κοντά στον πυρήνα ενός ατόμου του στόχου τότε το θετικό φορτίο του πυρήνα δρα επί του αρνητικού φορτίου του ηλεκτρονίου κι αυτό υφίσταται μια ελκτική δύναμη κι εκτρέπεται της αρχικής του πορείας με παράλληλη απώλεια ενέργειας. Σύμφωνα με τη θεωρία του κλασσικού ηλεκτρομαγνητισμού όταν ένα ηλεκτρικό φορτίο υφίσταται μια επιβράδυνση εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η ενέργεια του εκπεμπόμενου φωτονίου είναι άμεσα συνδεδεμένη με την απώλεια ενέργειας του προσπίπτοντος ηλεκτρονίου και ονομάζεται «ακτινοβολία πέδησης» ή «ακτινοβολία επιβράδυνσης» (Bremsstrahlung στα Γερμανικά). Ο πυρήνας του ατόμου του στόχου δε δέχεται καμία ενέργεια επειδή η μάζα του είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με τη μάζα του ηλεκτρονίου.

¹⁷ Η ηλεκτροστατική είναι ένας κλάδος της Φυσικής που μελετά τα ηλεκτρικά φορτία σε ηρεμία. Μεταξύ φορτισμένων σωματιδίων που βρίσκονται ακίνητα (ή σχεδόν ακίνητα), αναπτύσσονται ηλεκτρικές δυνάμεις που προκαλούνται από αυτά και ονομάζονται ηλεκτροστατικές. Απωστική λέγεται η ηλεκτροστατική δύναμη που αναπτύσσεται μεταξύ φορτίων με το ίδιο πρόσημο και ελκτική αυτή μεταξύ φορτίων με αντίθετο πρόσημο. Ο Γάλλος φυσικός Charles Augustin Coulomb διατύπωσε ένα νόμο που φέρει το όνομά του κι αφορά τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις: κάθε σημειακό ηλεκτρικό φορτίο ασκεί δύναμη σε κάθε άλλο σημειακό ηλεκτρικό φορτίο. Το μέτρο της δύναμης είναι ανάλογο του γινομένου των φορτίων που αλληλεπιδρούν και αντιστρόφως ανάλογο με το τετράγωνο της μεταξύ τους απόστασης. Πηγή από: Cottingham W.N. and Greenwood D.A. (1992), Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική (μετάφραση από το πρωτότυπο: An introduction to Nuclear Physics), σελ. 14-15 και 26-27.

Η ποσότητα της ακτινοβολίας πέδησης που παράγεται εξαρτάται από τον ατομικό αριθμό Z του στόχου, επειδή όσο περισσότερα τα πρωτόνια του πυρήνα τόσο μεγαλύτερη είναι η επιβράδυνσή του ηλεκτρονίου. Επιπρόσθετα, η ποσότητα της παραγόμενης ακτινοβολίας πέδησης εξαρτάται και από την τάση που εφαρμόζεται, διότι όσο ταχύτερα είναι τα ηλεκτρόνια τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να περάσουν μέσα στην περιοχή του πυρήνα. Η ακτινοβολία πέδησης ονομάζεται και «λευκή ακτινοβολία» καθώς το ενεργειακό της φάσμα είναι συνεχές όπως το φάσμα του λευκού φωτός (ορατό φως).¹⁸

2.4 Δομή και σταθερότητα της πυρηνικής ύλης

Ο πυρήνας του ατόμου αποτελείται από θετικά φορτισμένα πρωτόνια και ουδέτερα νετρόνια. Και τα δύο αυτά σωματίδια ονομάζονται νουκλεόνια, ο συνολικός αριθμός των οποίων ισούται με το μαζικό αριθμό (A) του πυρήνα. Η μάζα ηρεμίας ενός πυρήνα είναι πάντοτε μικρότερη από το άθροισμα των μαζών ηρεμίας των νετρονίων και των πρωτονίων που τον αποτελούν, η διαφορά έγκειται στην ισοδυναμία μάζας και ενέργειας του σχηματισμού του πυρήνα από τα συστατικά του.¹⁹ Η μετατροπή της μάζας σε ενέργεια ακολουθεί την εξίσωση του Albert Einstein, $E=m \cdot c^2$, όπου E είναι το ενεργειακό ισοδύναμο μιας μάζας m και c είναι η ταχύτητα του φωτός. Αυτή η διαφορά είναι γνωστή ως έλλειμμα μάζας.

Το γεγονός ότι ο πυρήνας αποτελεί μια σταθερή οντότητα δείχνει ότι η ενέργειά του είναι χαμηλότερη από εκείνη των συστατικών του. Επομένως για να τον διασπάσουμε στα συστατικά του χρειάζεται να δώσουμε ενέργεια. Η ενέργεια αυτή λέγεται «ενέργεια σύνδεσης ή συνοχής» του πυρήνα.

¹⁸Στη φυσική και την πυρηνική φυσική, με τον όρο «φάσμα» εννοούμε την κατανομή ενός πληθυσμού στην ενέργεια. Το φάσμα της ακτινοβολίας που διέρχεται από διαφανές σώμα μετά την πρόσπτωση λευκού φωτός σε αυτό, λέγεται φάσμα απορρόφησης του σώματος. Τα φάσματα απορρόφησης των διαφόρων σωμάτων διακρίνονται σε συνεχή και γραμμικά. Συνεχή φάσματα απορρόφησης δίνουν τα διαφανή έγχρωμα στερεά και υγρά σώματα. Γραμμικά φάσματα απορρόφησης δίνουν τα αέρια και οι ατμοί. Τα γραμμικά φάσματα απορρόφησης αποτελούνται από ένα συνεχές φάσμα στο οποίο υπάρχουν σκοτεινές γραμμές.

Πηγή από: <https://mediasrv.aul.gr/eclass/modules/video/file.php?course=ETDA137&id=345>

¹⁹Η ισοδυναμία μάζας και ενέργειας είναι το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξε ο φυσικός Albert Einstein με τη φυσική ερμηνεία της εξίσωσης $E=m \cdot c^2$ πως η μάζα αποτελεί μια μορφή ενέργειας. Στη Φυσική, η ισοδυναμία μάζας-ενέργειας εκφράζει την έννοια ότι η μάζα ενός σώματος αποτελεί μέτρο του ενεργειακού του περιεχομένου. Η ενέργεια ενός σώματος σε ηρεμία είναι ίση με το γινόμενο της μάζας ηρεμίας του επί έναν συντελεστή μετατροπής από μονάδες μάζας σε μονάδες ενέργειας. Πηγή από: Cottingham W.N. and Greenwood D.A. (1992), Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική (μετάφραση από το πρωτότυπο: An introduction to Nuclear Physics), σελ. 22-23.

Τα νουκλεόνια κρατούνται δέσμια στον πυρήνα υπό την επίδραση της ισχυρής πυρηνικής δύναμης, η οποία δρα μεταξύ όλων των πυρηνικών σωματιδίων υπερνικώντας την απωστική δύναμη Coulomb μεταξύ των πρωτονίων. Η δύναμη αυτή είναι πολύ ισχυρή αλλά με πολύ μικρή εμβέλεια. Ο πυρήνας, όπως και τα ηλεκτρόνια του ατόμου, βρίσκεται στην κατάσταση ελάχιστης ενέργειας. Ως εκ τούτου, η αναλογία πρωτονίων και νετρονίων σε έναν πυρήνα απορρέει από την ανάγκη για ελάχιστη ενέργεια η οποία προσφέρει σταθερότητα.

Υπάρχουν πυρήνες με μικρό αριθμό νουκλεονίων, όπως του υδρογόνου, οι οποίοι προκειμένου να έλθουν σε κατάσταση ελάχιστης ενέργειας ενώνονται και σχηματίζουν έναν μεγαλύτερο πυρήνα. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται πυρηνική σύντηξη και για να πραγματοποιηθεί απαιτείται ένα ποσό ενέργειας ικανό να υπερνικήσει την απωστική ηλεκτροστατική δύναμη που αναπτύσσεται μεταξύ των θετικά φορτισμένων πυρήνων.

Εντούτοις, υπάρχουν πυρήνες με εξαιρετικά μεγάλο αριθμό νουκλεονίων, όπως του ουρανίου ή του πλουτωνίου, οι οποίοι για να έλθουν στην κατάσταση ελάχιστης ενέργειας διασπώνται σε δύο μικρότερους πυρήνες. Η διαδικασία αυτή λέγεται πυρηνική σχάση και μπορεί να λάβει χώρα αυθόρμητα σε μερικές περιπτώσεις ή μπορεί να προκληθεί από τη διέγερση του πυρήνα εκπέμποντας μια ποικιλία σωματιδίων (πρωτόνια, νετρόνια ή σωματίδια α) ή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία υπό μορφή ακτίνων γ . Κατά την πυρηνική σχάση απελευθερώνεται μεγάλη ποσότητα ενέργειας και σχηματίζονται ραδιενεργά προϊόντα.

2.5 Ραδιοϊσότοπα και ραδιενέργεια

Ισότοπα, όπως προαναφέρθηκε, λέγονται τα άτομα με τον ίδιο αριθμό πρωτονίων (ατομικό αριθμό) στον πυρήνα τους και διαφορετικό αριθμό νετρονίων. Ραδιοϊσότοπα ή ραδιενεργά ισότοπα ή ραδιονουκλίδια ονομάζονται όλα τα ισότοπα του ίδιου χημικού στοιχείου των οποίων οι πυρήνες είναι ασταθείς και διαχέουν την περίσσεια ενέργειας εκπέμποντας αυθόρμητα ακτινοβολία με τη μορφή ακτίνων α , β και γ .

Κάθε χημικό στοιχείο έχει ένα ή περισσότερα ραδιενεργά ισότοπα. Περισσότερα από 1000 ραδιενεργά ισότοπα των διαφόρων στοιχείων είναι γνωστά. Περίπου 50 από αυτά βρίσκονται στη φύση, τα υπόλοιπα παράγονται τεχνητά είτε άμεσα ως προϊόντα πυρηνικών αντιδράσεων ή έμμεσα ως ραδιενεργά απόγονοι αυτών των προϊόντων. Τα ραδιενεργά ισότοπα έχουν πολλές χρήσιμες εφαρμογές.

Στην ιατρική, στην ακτινοθεραπεία για παράδειγμα, το κοβάλτιο-60 χρησιμοποιείται ευρέως ως πηγή ακτινοβολίας για την παύση ανάπτυξης του καρκίνου. Στην πυρηνική ιατρική, κάποια άλλα ραδιενεργά ισότοπα (τεχνήτιο-99) χρησιμοποιούνται ως ιχνηθέτες (χημικά στοιχεία που συνδυάζονται με τα ραδιοϊσότοπα) για διαγνωστικούς σκοπούς και άλλα, όπως το ραδιενεργό I-131 (ιώδιο-131) χρησιμοποιούνται στη θεραπεία κατά του καρκίνου του θυρεοειδούς.²⁰ Στη βιομηχανία, τα ραδιενεργά ισότοπα χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του πάχους των μεταλλικών ή πλαστικών φύλλων. Το ακριβές πάχος τους υποδεικνύεται από την ένταση των ακτινοβολιών που διεισδύουν στο υλικό που ελέγχεται. Άλλες σημαντικές εφαρμογές των ραδιοϊσοτόπων (πλουτώνιο-238) περιλαμβάνουν τη χρήση τους ως συμπαγών πηγών ηλεκτρικής ενέργειας σε διαστημόπλοια. Σε αυτές τις περιπτώσεις η θερμότητα που παράγεται κατά τη διάσπαση του ραδιενεργού ισότοπου μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό μέσω κυκλωμάτων θερμοηλεκτρικών συνδέσμων ή σχετικών συσκευών.

Ραδιενέργεια είναι η ιδιότητα των πυρήνων ορισμένων χημικών στοιχείων να διασπώνται αυθόρμητα εκπέμποντας ταυτόχρονα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ή σωματίδια. Κατά τον αυθόρμητο μετασχηματισμό ενός πυρήνα απελευθερώνεται πυρηνική ακτινοβολία και με ενέργεια ικανή να προκαλέσει ιονισμό στην ύλη (ιοντίζουσα ακτινοβολία). Το φαινόμενο ονομάζεται ραδιενεργός διάσπαση. Η πυρηνική ακτινοβολία συνίσταται σε υπο-ατομικά σωματίδια και σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (φωτόνια). Τα σωματίδια αυτά μπορεί να είναι ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια (σωματίδια ίδια με τα ηλεκτρόνια όμως με θετικό φορτίο), νετρόνια και σωματίδια-α.

«Όπως αναφέρει ο Γεώργιος Κουτρομπής (2003), μερικά ραδιενεργά στοιχεία εκπέμπουν ακτινοβολία και καταλήγουν σε ένα σταθερό στοιχείο. Σε πολλές όμως περιπτώσεις ο νέος πυρήνας είναι ραδιενεργός κι από αυτόν προκύπτει η δημιουργία ενός νέου πυρήνα. Το φαινόμενο σταματά όταν προκύψει σταθερός πυρήνας. Η όλη αυτή διαδικασία αφορά μια «ραδιενεργό οικογένεια» η οποία αποτελείται από τη «μητέρα», τη «θυγατέρα», την «εγγονή», δηλαδή υπάρχει «γενεολογική σύνδεση» μεταξύ τους».

2.5.1 Άλφα διάσπαση (ακτινοβολία α)

²⁰ Η Πυρηνική Ιατρική είναι μια σύγχρονη ειδικότητα της ιατρικής που χρησιμοποιεί ραδιοφάρμακα για διαγνωστικούς και θεραπευτικούς σκοπούς. Το ραδιοφάρμακο είναι ένα φαρμακευτικό σκεύασμα που περιέχει ένα ραδιονουκλίδιο ή μια ραδιοεπισημασμένη ένωση και χορηγείται ενδοφλέβια ή από το στόμα είτε να λάβουμε πληροφορίες (διάγνωση) για τη λειτουργία και το μεταβολισμό οργάνων του ανθρώπινου σώματος είτε για τη θεραπεία ορισμένων παθήσεων. Οι ιατρικές εξετάσεις που πραγματοποιούνται με αυτήν τη μέθοδο αυτή καλούνται σπινθηρογραφήματα. Πηγή από: Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής και άλλοι (2010), Μαθήματα Ακτινοπροστασίας για χειριστές ιατρικών μηχανημάτων ιοντιζουσών ακτινοβολιών, κεφάλαιο 10, σελίδα 75.

Το φαινόμενο της διάσπασης άλφα παρατηρείται σε βαρείς πυρήνες (πυρήνες με εξαιρετικά μεγάλο αριθμό νουκλεονίων). Η άλφα διάσπαση είναι μια αυθόρμητη διάσπαση ενός πυρήνα που ονομάζεται «πατρικός» σε έναν μικρότερο, που λέγεται «θυγατρικός» και ένα σωματίο-α (πυρήνας Ηλίου, He). Το σωματίο-α αποτελείται από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια και φέρει θετικό φορτίο +2. Κατά την άλφα διάσπαση εκπέμπεται ακτινοβολία α. Η διάσπαση του ραδίου σε ραδόνιο με εκπομπή ακτινοβολίας α αποτελεί το πιο γνωστό παράδειγμα άλφα διάσπασης.

Το σωματίο-α αφού χτυπήσει σε ένα φθορίζον διάφραγμα προκαλεί αρκετό ορατό φως επιτρέποντας την ανίχνευσή του. Μολονότι η ενέργειά του είναι μεγάλη, λίγα cm αέρα ή μερικά mm ιστού είναι επαρκή για να το σταματήσουν. Το βεληνεκές των σωματιδίων-α στον αέρα κυμαίνεται από 2-10 cm. Καθώς κινούνται μέσα στον αέρα κι εφόσον είναι θετικώς φορτισμένα, τα σωματία-α μετακινούν ηλεκτρόνια από τα άτομα και παράγουν ισχυρούς ιονισμούς.

2.5.2 Βήτα⁻ διάσπαση (ακτινοβολία β⁻)

Κατά τη βήτα διάσπαση εκπέμπεται ακτινοβολία β⁻ η οποία οφείλεται στην αυθόρμητη διάσπαση ενός πυρήνα (πατρικός) σε ένα θυγατρικό και ένα ηλεκτρόνιο (σωμάτιο-β⁻). Ο θυγατρικός πυρήνας που προκύπτει από τη διάσπαση έχει ένα πρωτόνιο περισσότερο κι ένα νετρόνιο λιγότερο από τον πατρικό πυρήνα. Η ακτινοβολία β⁻ αποτελείται από ηλεκτρόνια.

Κατά τη βήτα διάσπαση συμβαίνει ένα περίεργο φαινόμενο: βγαίνουν ηλεκτρόνια από έναν πυρήνα τα οποία δεν περιέχονται μέσα του. Θεωρείται λοιπόν ότι ένα νετρόνιο του πυρήνα μετατρέπεται σε ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο. Αυτό σημαίνει ότι ο μαζικός αριθμός του πυρήνα παρέμεινε ως είχε, αλλά ο ατομικός του αριθμός αυξήθηκε κατά μία μονάδα αφού περιέχει ένα πρωτόνιο επιπλέον μέσα στον πυρήνα.

Σύμφωνα με τη θεωρία του Wolfgang Pauli (διατυπώθηκε το 1930) κατά τη βήτα διάσπαση εκπέμπεται ένα στοιχειώδες σωματίο το νεutrίνο το οποίο έχει ενέργεια το υπόλοιπο μέχρι τη μέγιστη ενέργεια. Επομένως, σε κάθε διάσπαση εκλύεται η μέγιστη ενέργεια που κατανέμεται μεταξύ των δύο σωματίων, του ηλεκτρονίου και του νετρονίου. Το νεutrίνο είναι ουδέτερο σωματίο με μάζα μικρότερη από τη μάζα του ηλεκτρονίου.

2.5.3 Βήτα⁺ διάσπαση (ακτινοβολία β⁺)

Κατά τη διάσπαση βήτα⁺ ο πατρικός πυρήνας διασπάται σε ένα θυγατρικό και σε ένα σωματίο-β⁺. Ο θυγατρικός πυρήνας που προκύπτει περιέχει ένα πρωτόνιο λιγότερο και ένα νετρόνιο περισσότερο από τον πατρικό, δηλαδή το αντίθετο από τη διάσπαση β⁻. Το σωματίο-β⁺ λέγεται ποζιτρόνιο και είναι ένα ηλεκτρόνιο με θετικό φορτίο.²¹

Το ποζιτρόνιο προκύπτει από τη μετατροπή ενός πρωτονίου σε ένα νετρόνιο και ένα ποζιτρόνιο. Το ποζιτρόνιο είναι ασταθές και το αποτέλεσμα είναι ότι καθώς περνά κοντά από ένα ηλεκτρόνιο εξαυλώνεται και στη θέση του εκπέμπονται δύο ακτίνες γ.

2.5.4 Ακτινοβολία γ

Κατά τη διάσπαση άλφα και βήτα (β⁻ και β⁺) είναι πιθανό ο θυγατρικός πυρήνας να βρίσκεται σε διεγερμένη ενεργειακή κατάσταση, δηλαδή να έχει περισσότερη ενέργεια απ' ό τι χρειάζεται. Την επιπλέον ενέργεια την ελευθερώνει υπό μορφή γ ακτινοβολίας που είναι φωτόνια υψηλής ενέργειας. Η εκπομπή των σωματιδίων α ή β και η εκπομπή των ακτίνων γ συμβαίνει σχεδόν ταυτόχρονα. Ο πυρήνας κατά την αποδιέγερση αποβάλλει την ενέργεια με τη μορφή ενός ή περισσότερων φωτονίων και αντίστοιχα το φάσμα αποτελείται από μία ή περισσότερες γραμμές. Η ακτινοβολία γ είναι ίδιας ποιότητας με τη Χ της ίδιας ενέργειας. Η μόνη διαφορά έγκειται στο ότι οι ακτίνες Χ προέρχονται από διεγερμένα άτομα ενώ οι ακτίνες γ από διεγερμένους πυρήνες. Η ηλεκτρομαγνητική αποδιέγερση του πυρήνα σε μια κατώτερη ενεργειακή στάθμη με την εκπομπή γ ακτινοβολίας ονομάζεται γ- διάσπαση (γάμμα διάσπαση).

Η γ- διάσπαση περιλαμβάνει δύο ακόμα διαδικασίες: την εσωτερική μετατροπή και την εσωτερική δημιουργία ζεύγους. Σε ορισμένες διασπάσεις ο διεγερμένος πυρήνας αποβάλλει την παραπάνω ενέργεια με εσωτερική μετατροπή. Κατά τη διεργασία της εσωτερικής μετατροπής, η γ ακτινοβολία προερχόμενη από τον πυρήνα δρα με ένα από τα περιφερειακά ηλεκτρόνια του ατόμου και το εκτοξεύει από το άτομο.

²¹Το ποζιτρόνιο είναι το σωματίδιο της αντισύλης που αντιστοιχεί στο ηλεκτρόνιο. Αυτό σημαίνει ότι έχει την ίδια ακριβώς μάζα με το ηλεκτρόνιο αλλά αντίθετο ηλεκτρικό φορτίο. Όταν κρατηθεί σε περιβάλλον μακριά από τη συνηθισμένη ύλη δε διασπάται και επομένως είναι ένα σταθερό σωματίδιο όπως και το ηλεκτρόνιο. Εντούτοις όταν ένα ποζιτρόνιο συγκρουστεί με ένα ηλεκτρόνιο τότε τα δύο σωματίδια εξαυλώνονται βίαια. Η απόρροια της σύγκρουσης των δύο σωματιδίων είναι η μετατροπή τους σε φωτόνια ακτινοβολίας γ ή σπανιότερα σε άλλα σωματίδια. Με τον όρο «εξαύλωση» εννοούμε την εξαφάνιση του υλικού σώματος. Πηγή από: Κουτρομπής Π. Γεώργιος (2003), Ακτινοφυσική 1, κεφάλαιο 2, σελ. 49.

Το ηλεκτρόνιο αυτό ονομάζεται «ηλεκτρόνιο εσωτερικής μετατροπής». Το άτομο πλέον βρίσκεται σε κατάσταση διέγερσης, εφόσον έχει χάσει ένα ηλεκτρόνιο και το περίσσειμα ενέργειας αντιστοιχεί σε ενέργεια φθορισμού ή σε ηλεκτρόνιο Auger.²²

Στην εσωτερική δημιουργία ζεύγους η πλεονάζουσα ενέργεια μετατρέπεται απευθείας στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο ενός πυρήνα σε ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο που εκπέμπονται ταυτόχρονα. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η εσωτερική δημιουργία ζεύγους απαιτείται η πλεονάζουσα ενέργεια του ασταθούς πυρήνα να είναι τουλάχιστον ισοδύναμη με τις συνδυασμένες μάζες ενός ηλεκτρονίου και ενός ποζιτρονίου (ισοδυναμία μάζας και ενέργειας).

2.5.5 Η διεισδυτικότητα των ακτινοβολιών α , β και γ

Τα σωμάτια α έχουν μεγάλη σχετικά μάζα με απόρροια να κινούνται αργά μέσα στο υλικό που προσπίπτουν. Τη στιγμή που θα συναντήσουν τα πρώτα άτομα του υλικού, θα αλληλεπιδράσουν με αυτά και θα απολέσουν τάχιστα την ενέργειά τους. Ως εκ τούτου, η ακτινοβολία α (σωμάτια α) έχει πολύ μικρή διεισδυτικότητα και θωρακίζεται με μικρού πάχους απορροφητή όπως με ένα φύλλο χαρτί.

Τα σωμάτια β μολονότι είναι μικρής μάζας διαθέτουν μεγαλύτερη ταχύτητα σε σύγκριση με τα σωμάτια α . Κατά τη σύγκρουσή τους με την ύλη χάνουν σταδιακά την ενέργειά τους. Άρα, η διεισδυτικότητα της ακτινοβολίας β είναι περιορισμένη, αλλά μεγαλύτερη από αυτήν της ακτινοβολίας α και μπορεί να θωρακιστεί με υλικό αρκετού πάχους και μικρού Ατομικού αριθμού Z .

Εν συνεχεία, οι ακτίνες γ χαρακτηρίζονται από μεγάλη διεισδυτικότητα. Οι ακτίνες γ μπορούν να διεισδύσουν ακόμα και σε υλικά με μεγάλη πυκνότητα και γι' αυτό θωρακίζονται μόνο με υλικά υψηλού Ατομικού αριθμού Z (μόλυβδος), κατάλληλου πάχους ή άλλα υλικά αυξημένου σχετικά πάχους.

Τέλος, τα νετρόνια διακρίνονται σε ταχεία, μεσαία και θερμικά αναλόγως την ταχύτητά τους. Όταν τα νετρόνια εισέρχονται στο υλικό υφίστανται συγκρούσεις και χάνουν την ενέργειά τους σχετικά αργά. Καθότι η ακτινοβολία των νετρονίων διεισδύει εις βάθος

²²Η επίδραση Auger (Auger effect) είναι ένα φαινόμενο στην Ατομική Φυσική όπου κατά την αποδιέγερση ενός ατόμου δεν απελευθερώνεται ενέργεια με τη μορφή ενός φωτονίου, αλλά το ηλεκτρόνιο μεταδίδει την πλεονάζουσα ενέργεια σε ένα άλλο ηλεκτρόνιο το οποίο εκτοξεύεται από το άτομο. Το εκτοξευόμενο ηλεκτρόνιο λέγεται «ηλεκτρόνιο Auger». Πηγή από: Κουτρομπής Π. Γεώργιος (2003), Ακτινοφυσική 1, κεφάλαιο 2, σελ. 51.

ακόμα κι αν το υλικό είναι υψηλής πυκνότητας, μπορεί να θωρακιστεί με υλικό χαμηλού Ατομικού αριθμού Z (νερό, παραφίνη, σκυρόδεμα).

2.6 Εκθετική απομείωση – Ο εκθετικός νόμος των ραδιενεργών διασπάσεων

Σε ένα πλήθος ραδιενεργών ατόμων διαπιστώνεται μια προοδευτική μείωση του αριθμού τους η οποία οφείλεται στο φαινόμενο της διάσπασης (απομείωσης). Ο ακριβής χρόνος όπου ένας ραδιενεργός πυρήνας θα διασπαστεί δεν μπορεί να προβλεφθεί, ωστόσο για ένα μεγάλο αριθμό πυρήνων ο νόμος της στατιστικής διάσπασης είναι γνωστός και λέγεται «νόμος των ραδιενεργών διασπάσεων». Ο νόμος των ραδιενεργών διασπάσεων προβλέπει το πώς φθίνει ο αριθμός των πυρήνων μιας δεδομένης ραδιενεργού ουσίας που δεν έχουν διασπαστεί σε χρόνο t .

Αν σε μια χρονική στιγμή t υπάρχουν N υπάρχοντες ραδιενεργοί πυρήνες μετά από χρόνο Δt θα διασπαστεί ένας αριθμός ΔN των υπάρχοντων πυρήνων. Ο αριθμός ΔN είναι ανάλογος των υπάρχοντων ραδιενεργών πυρήνων N και του χρόνου Δt σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\Delta N = -\lambda * N * \Delta t$$

όπου λ είναι μια σταθερά και λέγεται «σταθερά διάσπασης». Το αρνητικό πρόσημο στην εξίσωση δείχνει ότι η μεταβολή ΔN αφορά μείωση.

Με την ολοκλήρωση της παραπάνω σχέσης προκύπτει:

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

Όπου το N_0 είναι ο αριθμός των πυρήνων σε χρόνο $t=0$.

Επίσης ισχύει:

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

Ο αριθμητής παριστάνει τον αριθμό των διασπάσεων στη μονάδα του χρόνου και ο παρονομαστής τον ολικό αριθμό των υπάρχοντων πυρήνων. Ως εκ τούτου, η σταθερά διάσπασης λ δίνει την πιθανότητα διάσπασης του πυρήνα στη μονάδα του χρόνου. Η αριθμητική τιμή του λ εκφράζει τη στατιστική πιθανότητα διάσπασης κάθε ραδιενεργού ατόμου στη μονάδα του χρόνου.

Ο χρόνος υποδιπλασιασμού ή χρόνος ημιζωής (T) είναι ο χρόνος που απαιτείται ώστε ο αριθμός των ραδιενεργών πυρήνων να μειωθεί στο μισό του αρχικού αριθμού N_0 . Στη συνέχεια οι μισοί από εκείνους που απομένουν διασπώνται μέσα στο επόμενο διάστημα ($T_{1/2}$). Η απόλυτη τιμή του ρυθμού μεταβολής του αριθμού των πυρήνων ονομάζεται «ενεργότητα».

Στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (Le Système International d'unités στα γαλλικά, S.I.) μονάδα ενεργότητας είναι το 1 Becquerel (1Bq) και ορίζεται ως ο αριθμός των πυρήνων που διασπώνται στη μονάδα του χρόνου ($1\text{Bq}=1 \text{ διάσπαση/s}, 1\text{s}^{-1}$). Μια άλλη μονάδα μέτρησης της ενεργότητας είναι το Ci (Curie).²³ Το 1 Ci ισούται με $3,7 \cdot 10^{10}\text{Bq}$, ενώ το 1Bq ισούται με $2,7 \cdot 10^{-11}\text{Ci}$. Μολονότι η επίσημη μονάδα μέτρησης είναι το Becquerel, στις διαγνωστικές μελέτες χρησιμοποιείται το Curie και τα υποπολλαπλάσιά του. Ειδικότερα, οι ποσότητες των ραδιενεργών ισοτόπων που χρησιμοποιούνται στα πυρηνικά εργαστήρια είναι της τάξεως του mCi ή μCi. Στις θεραπείες με ραδιοϊσότοπα χρειάζονται χιλιάδες Curie για την επίτευξή τους.

2.7 Ανακεφαλαίωση

Από την εποχή του Δημόκριτου με τη θεωρία του για το άτομο έως τη σύγχρονη εποχή μεσολάβησαν χιλιάδες χρόνια ερευνών και ανακαλύψεων. Οι παρατηρήσεις και οι ανακαλύψεις των ερευνητών στον τομέα της Φυσικής για τη δομή της ύλης και την ηλεκτρομαγνητική και σωματιδιακή ακτινοβολία συνέβαλαν καθοριστικά στις γνώσεις που διαθέτουμε στις μέρες μας καθώς και στην εφαρμογή αυτών με απόρροια την εξέλιξη της τεχνολογίας στον τομέα της ιατρικής, της βιομηχανίας και της αστρονομίας και τη βελτίωση της ποιότητας της ζωής των ανθρώπων.

Αξιοσημείωτο είναι ότι όλοι οι ζώντες οργανισμοί στη Γη εξαρτώνται από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία η οποία εκπέμπεται από τον Ήλιο. Η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται μέσω της φωτοσύνθεσης των φυτών, σε χημική με αποτέλεσμα την απελευθέρωση οξυγόνου και την παραγωγή πλούσιων οργανικών ενώσεων, ζωτικής σημασίας για όλους τους έμβιους οργανισμούς. Επιπρόσθετα, η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται μέσω της φωτοσύνθεσης του φυτοπλαγκτόν, σε χημική με συνέπεια την απελευθέρωση οξυγόνου και την παραγωγή πλούσιων οργανικών ενώσεων, αναγκαίων της ύπαρξης της ζωής στους ωκεανούς.

Από την άλλη, οι ραδιενεργές πηγές αποτελούν βασικό εργαλείο για τη μελέτη των ζωντανών οργανισμών και την παραγωγή ενέργειας για τη θερμότητα και την ηλεκτρική

²³ Η μονάδα μέτρησης της ραδιενέργειας Bq δόθηκε προς τιμή του Γάλλου φυσικού Henri Becquerel που ανακάλυψε τη ραδιενέργεια. Ο Henri Becquerel μοιράστηκε το βραβείο Νόμπελ με τον Pierre Curie και τη Marie Curie. Πηγή από: Davidovits P.(2007), Physics in Biology and Medicine third edition, Complementary Science series, p. 2 and 49.

ενέργεια. Επιπλέον, στην πυρηνική ιατρική χρησιμοποιούνται τα ραδιοϊσότοπα για τη διάγνωση και τη θεραπεία ασθενειών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΙΟΝΤΙΖΟΥΣΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΎΛΗ–ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ

3.1 Εισαγωγή

Η ανίχνευση τόσο της σωματιδιακής όσο και της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας βασίζεται στην αλληλεπίδρασή της με την ύλη. Η ευκολία ανίχνευσης εξαρτάται από το βαθμό αυτής της αλληλεπίδρασης. Η ακτινοβολία X και γ αποτελείται από φωτόνια τα οποία συγκρούονται με την ύλη και ειδικότερα με τα περιφερειακά ηλεκτρόνια των ατόμων.²⁴ Η παράμετρος που καθορίζει τον τρόπο αλληλεπίδρασης είναι η ενέργεια των φωτονίων και το είδος του υλικού που διασχίζουν.

Ύστερα από τη σύγκρουση η ενέργεια του φωτονίου μεταφέρεται όλη ή μέρος αυτής με τη μορφή κινητικής ενέργειας στο ηλεκτρόνιο το οποίο εκτινάσσεται. Στη συνέχεια, το ηλεκτρόνιο του υλικού αποκτά υψηλή κινητική ενέργεια προκαλώντας ιονισμούς, διεγέρσεις ή και ακτινοβολία πέδησης στο υλικό από όπου ξεκίνησε. Έπειτα, το φωτόνιο εξαφανίζεται ή ελαττώνεται η ενέργειά του και παράλληλα μεταβάλλεται η διεύθυνση διάδοσής του. Η σύγκρουση αυτή αποτελεί τη στοιχειώδη επίδραση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας επί της ύλης.

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναπτύξουμε τους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης των φωτονίων επί της ύλης. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, το φαινόμενο Compton και η Δίδυμη γένεση αποτελούν τους μηχανισμούς που παράγουν υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνια από την πρόσπτωση των φωτονίων στην ύλη. Ακολούθως, θα αναλύσουμε το γραμμικό συντελεστή εξασθένησης, το Νόμο της εκθετικής εξασθένησης της ακτινοβολίας και το πάχος υποδιπλασιασμού του υλικού. Τέλος, θα παρουσιάσουμε τη

²⁴ Περιφερειακό ηλεκτρόνιο λέγεται το ηλεκτρόνιο που περιφέρεται σε κάποια στοιβάδα (τροχιά) γύρω από τον πυρήνα. Πηγή από: Davidovits P. (2007), Physics in Biology and Medicine third edition, Complementary Science series, p. 240.

δοσιμετρία της ακτινοβολίας: απορροφούμενη δόση, έκθεση, ισοδύναμη δόση και ενεργός δόση.

3.2 Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Η σύγκρουση ενός φωτονίου με ένα περιφερειακό ηλεκτρόνιο του ατόμου του υλικού μπορεί να προκαλέσει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο προκαλείται εφόσον η ενέργεια του φωτονίου είναι χαμηλή (μικρότερη των 50 keV).

Το φωτόνιο εγκαταλείπει όλη του την ενέργεια και χάνεται.

Ένα μικρό ποσοστό της ενέργειας καταναλίσκεται για να βγάλει το ηλεκτρόνιο από την προϋπάρχουσα τροχιά του. Η ενέργεια αυτή είναι ίση με την ενέργεια σύνδεσης του ηλεκτρονίου στο άτομο. Το υπόλοιπο της ενέργειας που απορροφάται αποτελεί την κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου το οποίο εγκαταλείπει το άτομο και απομακρύνεται από αυτό. Το ηλεκτρόνιο που ελευθερώνεται ονομάζεται «φωτοηλεκτρόνιο». Εφόσον το ηλεκτρόνιο εγκατέλειψε τη θέση του, ένα άλλο ηλεκτρόνιο από υψηλότερη στοιβάδα θα καλύψει την κενή θέση και θα υπάρξει εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας. Το άτομο που έχασε το ηλεκτρόνιο θα είναι πλέον φορτισμένο θετικά (ιονισμός).

Η ενέργεια σύνδεσης του ηλεκτρονίου στο άτομο εξαρτάται από την τροχιά όπου βρίσκεται το ηλεκτρόνιο. Όσο πλησιέστερα στον πυρήνα βρίσκεται η τροχιά του ηλεκτρονίου τόσο μεγαλύτερη η ενέργεια σύνδεσης. Επιπροσθέτως, η ενέργεια σύνδεσης του ηλεκτρονίου στο άτομο εξαρτάται από τον ατομικό αριθμό Z του ατόμου. Η ενέργεια σύνδεσης του ηλεκτρονίου αυξάνεται με την αύξηση του ατομικού αριθμού διότι το ηλεκτρόνιο μιας συγκεκριμένης στοιβάδας είναι πιο ισχυρά δεμένο με τον πυρήνα όταν αυτός περιέχει περισσότερα πρωτόνια.

3.3 Το φαινόμενο Compton

Κατά το φαινόμενο Compton μεμονωμένα φωτόνια ακτίνων γ ή X συγκρούονται με ηλεκτρόνια που είναι ελεύθερα ή εξωτερικά, δηλαδή αυτά που βρίσκονται στην εξωτερική στοιβάδα του ατόμου κι έχουν τη μικρότερη ενέργεια σύνδεσης, επομένως είναι πολύ «χαλαρά» συνδεδεμένα στο άτομο. Τα συγκρουόμενα φωτόνια μεταφέρουν μέρος της ενέργειας και της ορμής τους στα ηλεκτρόνια.²⁵

²⁵Η «ορμή» αποτελεί προϊόν της μάζας ενός σωματιδίου και της ταχύτητάς του. Η ορμή είναι μια διανυσματική ποσότητα, δηλαδή έχει τόσο μέγεθος όσο και κατεύθυνση. Ο δεύτερος Νόμος κίνησης του Άγγλου φυσικού και μαθηματικού Isaac Newton (Νεύτωνας) αναφέρει ότι ο ρυθμός μεταβολής της ορμής είναι ίσος με τη δύναμη που ασκεί

Τα ηλεκτρόνια με τη σειρά τους έχοντας περίσσειμα ενέργειας εγκαταλείπουν το άτομο. Τα ηλεκτρόνια αυτά ονομάζονται «ηλεκτρόνια Compton». Τα φωτόνια συνεχίζουν με αλλαγή της διεύθυνσής τους (σκέδαση) και μικρότερη ενέργεια καθότι έδωσαν μέρος αυτής στα ηλεκτρόνια.

Η αλλαγή της σκέδασης του φωτονίων μπορεί να είναι από μερικές μοίρες έως και 180° , δηλαδή να κατευθυνθούν προς τα πίσω. Αν η γωνία σκέδασης είναι 180° τότε λέμε πως έχουμε «οπισθοσκέδαση» και τα φωτόνια είναι «οπισθοσκεδαζόμενα». Αν η γωνία σκέδασης είναι μικρότερη από 180° , τότε τα φωτόνια είναι «σκεδαζόμενα». Το μέγεθος της γωνίας σκέδασης εξαρτάται από την ποσότητα της ενέργειας που μεταβιβάζεται στα ηλεκτρόνια Compton. Το άτομο πλέον εφόσον έχει χάσει ένα ηλεκτρόνιο, είναι φορτισμένο θετικά (ιονισμός του ατόμου). Το φαινόμενο Compton πραγματοποιείται όταν η ενέργεια των φωτονίων είναι σχετικά υψηλή (μεγαλύτερη των 50keV).

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου μια μονοενεργειακή δέσμη φωτονίων προσπίπτει σε ένα υλικό και τα παραγόμενα ηλεκτρόνια Compton χάνουν όλη τους την ενέργεια που απέκτησαν κοντά στην περιοχή όπου παρήχθησαν. Εν προκειμένω, η ενέργεια απορροφάται μέσα στο υλικό.²⁶ Τουναντίον, τα σκεδαζόμενα φωτόνια διασχίζουν μεγάλες αποστάσεις χωρίς να υποστούν σύγκρουση και εξέρχονται από το υλικό. Ως εκ τούτου, η ενέργεια των σκεδαζόμενων φωτονίων δεν έχει σχέση με το χώρο του υλικού κοντά στο σημείο που συνέβη το φαινόμενο Compton.

Το φαινόμενο Compton είναι ανεξάρτητο του Ατομικού αριθμού Z του υλικού και μειώνεται με την αύξηση της ενέργειας. Η ενέργεια των φωτονίων και η γωνία σύγκρουσης είναι οι παράγοντες που καθορίζουν το ποσοστό της σκεδαζόμενης ενέργειας και το ποσοστό της ενέργειας που απορροφάται. Στις χαμηλές ενέργειες φωτονίων το ποσοστό της ενέργειας σκέδασης είναι μεγάλο, ωστόσο είναι πολύ μικρό

το σωματίδιο. Οι επιστήμονες απλοποίησαν τη μελέτη των πολύπλοκων φαινομένων της κρούσης και κατέληξαν στην αρχή της διατήρησης της ορμής σύμφωνα με την οποία: η συνολική ορμή ενός μεμονωμένου συστήματος σωμάτων διατηρείται σταθερή. Η αρχή αυτή είναι άμεση συνέπεια του τρίτου Νόμου του Νεύτωνα κατά τον οποίο η δράση είναι ίση με την αντίδραση.

Πηγή από: <https://www.britannica.com/biography/Isaac-Newton>

²⁶Με τον όρο «απορρόφηση» εννοούμε τη μεταβίβαση ενέργειας των προσπιπτόντων φωτονίων στα ηλεκτρόνια. Ο όρος «σκέδαση» αναφέρεται στη μεταβίβαση ενέργειας στα σκεδαζόμενα φωτόνια. Πηγή από: Κουτρομπής Π. Γεώργιος (2003), Ακτινοφυσική 1, κεφάλαιο 4, σελίδα 117.

στις υψηλές ενέργειες φωτονίων. Το αντίθετο ισχύει για το ποσοστό της ενέργειας που μεταφέρεται στα ηλεκτρόνια Compton και απορροφάται.

3.4 Η Δίδυμη γένεση

Η Δίδυμη γένεση αποτελεί μια διαδικασία που οδηγεί στη μετατροπή ενός φωτονίου σε ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο. Το ποζιτρόνιο όπως προαναφέρθηκε, είναι σωματίδιο της αντιύλης και έχει ίδια μάζα με το ηλεκτρόνιο και αντίθετο ηλεκτρικό φορτίο από αυτό (δηλαδή θετικό). Στη Δίδυμη γένεση μετατρέπεται η ενέργεια (φωτόνιο) σε μάζα (ηλεκτρόνιο- ποζιτρόνιο).

Για να επιτευχθεί η Δίδυμος γένεση θα πρέπει το φωτόνιο να είναι υψηλής ενέργειας (τουλάχιστον $1,022 \text{ MeV} = 1022 \text{ keV}$, φωτόνια ακτίνων γ) και να εισχωρήσει στο έντονο ηλεκτρικό πεδίο που υπάρχει κοντά στον πυρήνα του ατόμου του υλικού. Αν είναι η ενέργεια του φωτονίου είναι μεγαλύτερη από $1,022 \text{ MeV}$, τότε το περίσσειμά της μεταφέρεται στο ηλεκτρόνιο και το ποζιτρόνιο ως κινητική ενέργεια. Στη συνέχεια, το ζεύγος ποζιτρονίου- ηλεκτρονίου προκαλεί διεγέρσεις και ιονισμούς προκειμένου να αποδώσει την ενέργεια που του μεταβιβάστηκε από το φωτόνιο. Όταν μειωθεί πολύ η ταχύτητα του ποζιτρονίου, τότε αυτό δεν μπορεί να παραμείνει ελεύθερο, παρά να αλληλεπιδράσει με ένα ηλεκτρόνιο του υλικού και να εξαϋλωθεί μαζί του. Η εξαϋλωση αποτελεί το αντίθετο της Διδύμου γένεσης επειδή η μάζα του ποζιτρονίου και του ηλεκτρονίου χάνεται και μετασχηματίζεται σε ηλεκτρομαγνητική ενέργεια υπό τη μορφή δύο φωτονίων. Τα δύο φωτόνια εκπέμπονται σε αντίθετες κατευθύνσεις.

3.5 Γραμμικός συντελεστής εξασθένησης

Η αλληλεπίδραση ενός φωτονίου με την ύλη αποτελεί τυχαίο γεγονός. Ένα φωτόνιο διερχόμενο από την ύλη μπορεί να αλληλεπιδράσει με οποιοδήποτε μηχανισμό με τα άτομα του υλικού ωστόσο μόνο μια φορά και με έναν από τους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης. Στην περίπτωση όπου μία δέσμη φωτονίων αλληλεπιδράσει με την ύλη, τότε είναι δυνατόν να συμβούν ταυτόχρονα όλοι οι μηχανισμοί.

Το μόνο που μπορούμε να γνωρίζουμε με βεβαιότητα είναι τη συνολική πιθανότητα να συμβεί αλληλεπίδραση ανά μονάδα διαδρομής του φωτονίου καθώς και τις αντίστοιχες επιμέρους πιθανότητες για κάθε είδος αλληλεπίδρασης. Το μέγεθος το οποίο περιγράφει την πιθανότητα αλληλεπίδρασης του φωτονίου με την ύλη ανά μονάδα μήκους διαδρομής του σε αυτή ονομάζεται «γραμμικός συντελεστής εξασθένησης» και

συμβολίζεται με μ . Ο συντελεστής μ εξαρτάται από την ενέργεια του φωτονίου και το είδος του υλικού (πυκνότητα και Ατομικό αριθμό Z του υλικού).

Το άθροισμα των επιμέρους γραμμικών συντελεστών εξασθένησης για κάθε μηχανισμό αλληλεπίδρασης της ιοντίζουσας ακτινοβολίας με την ύλη δίνει τον ολικό συντελεστή εξασθένησης. Κάθε μηχανισμός έχει τη δική του πιθανότητα αλληλεπίδρασης. Για χαμηλές ενέργειες φωτονίων (μικρότερες των 50 keV), υψηλής πυκνότητας και υψηλού Ατομικού αριθμού Z υλικά, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο έχει τη μεγαλύτερη πιθανότητα να συμβεί. Το φαινόμενο Compton έχει τη μεγαλύτερη πιθανότητα να πραγματοποιηθεί σε μέσες και υψηλές ενέργειες (άνω των 50 keV), υψηλή πυκνότητας και ανεξαρτήτως του Ατομικού αριθμού Z του υλικού. Τέλος, η πιθανότητα να προκληθεί το φαινόμενο της Δίδυμης γένεσης είναι μεγαλύτερη στις υψηλές ενέργειες φωτονίων (άνω του 1,022 MeV), υψηλής πυκνότητας και υψηλού Ατομικού αριθμού Z υλικά.

3.6 Ο Νόμος της εκθετικής εξασθένησης

Η εξασθένηση μιας δέσμης φωτονίων ή σωματιδίων προκειμένου να μελετηθεί πρέπει να γνωρίζουμε την ενέργεια και την έντασή της. Η ένταση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ορίζεται ως το πλήθος των φωτονίων ή των σωματιδίων που περνούν από μία επιφάνεια εμβαδού 1cm^2 (τετραγωνικό εκατοστό) σε χρόνο 1 sec και συμβολίζεται με I .

Μετά την πρόσπτωση μιας δέσμης φωτονίων I_0 σε υλικό πάχους x , κάποια φωτόνια θα αλληλεπιδράσουν με το υλικό είτε θα σκεδαστούν είτε θα απορροφηθούν και κάποια άλλα δε θα αλληλεπιδράσουν. Η συνάρτηση που μας δίνει τον αριθμό των φωτονίων N που δε θα αλληλεπιδράσουν με το υλικό πάχους x , αν ο αρχικός αριθμός των φωτονίων που εισήλθαν σε αυτό είναι N_0 είναι η ακόλουθη:

$$N=N_0 \cdot e^{-\mu x}$$

όπου μ : ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης και e η βάση των φυσικών αλγορίθμων ($e=2,71828$).

Κατά συνέπεια η ένταση της ακτινοβολίας I που εξέρχεται από το υλικό πάχους x χωρίς να έχει αλληλεπιδράσει με αυτό, δίνεται από την εξίσωση:

$$I=I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

όπου I_0 η δέσμη φωτονίων που εισήλθε στο υλικό πάχους x .

Οι δύο παραπάνω σχέσεις αποτελούν το Νόμο της εκθετικής εξασθένησης της ακτινοβολίας.

3.7 Το πάχος υποδιπλασιασμού

Το πάχος υποδιπλασιασμού ορίζεται ως το πάχος της ύλης που σταματά το 50% των προσπιπτόντων φωτονίων κι επιτρέπει να διέλθει το άλλο 50%, δηλαδή το πάχος δεδομένου υλικού που απαιτείται για να μειώσει την ένταση μιας δέσμης φωτονίων στο ήμισυ της αρχικής. Το πάχος υποδιπλασιασμού συμβολίζεται διεθνώς HVL από τα αρχικά των λέξεων Half Value Layer. Το πάχος υποδιπλασιασμού ενός υλικού αποτελεί μια παράμετρο για τη διεισδυτικότητα της δέσμης της ακτινοβολίας. Ένα πάχος 2HVL ελαττώνει τη δέσμη στο 25% της αρχικής της τιμής, ένα πάχος 3HVL στο 12,5% και ένα πάχος 4HVL στο 6,25%.

Το πάχος υποδιπλασιασμού ενός υλικού εξαρτάται από την ενέργεια των φωτονίων και το υλικό (συντελεστής μ). Η σχέση του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ και του HVL είναι η ακόλουθη:

Όταν $x = 1\text{HVL}$ τότε $N = N_0/2$

Οπότε η σχέση $N = N_0 \cdot e^{-\mu x}$ γράφεται $N_0/2 = N_0 \cdot e^{-\mu x}$ και προκύπτει:

$$x = \frac{0,693}{\mu}$$

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι το πάχος υποδιπλασιασμού HVL και ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ είναι αντιστρόφως ανάλογα. Αυτό σημαίνει πως για μεγάλη ενέργεια φωτονίων η τιμή του μ είναι μικρή οπότε το HVL γίνεται διαρκώς μεγαλύτερο.

3.8 Δοσιμετρία της ακτινοβολίας

Η αλληλεπίδραση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας με την ύλη προκαλεί φυσικά, χημικά, βιοχημικά και βιολογικά αποτελέσματα. Οι ποσοτικές μετρήσεις και οι υπολογισμοί οι οποίοι απαιτούνται για την καθιέρωση ή τη χρήση αριθμητικών σχέσεων συνδέουν τα παραπάνω αποτελέσματα με ποσότητες που χαρακτηρίζουν τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες.

Η δοσιμετρία αποτελεί τον κλάδο της φυσικής επιστήμης που ασχολείται με τη μέτρηση, τον υπολογισμό και την αξιολόγηση της δόσης της ιοντίζουσας ακτινοβολίας η οποία απορροφάται από ένα ζωντανό οργανισμό ή από οποιοδήποτε υλικό που έχει εκτεθεί σε αυτήν. Η ενέργεια που αποτίθεται όταν διεισδύσει η ακτινοβολία στο

βιολογικό υλικό παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Η δοσιμετρία συνιστά βασικό εργαλείο στην ακτινοπροστασία.

3.8.1 Απορροφούμενη δόση

Η μέτρηση της απορροφούμενης δόσης D αποτελεί σημαντικό βήμα στη διαδικασία της δοσιμετρικής ανάλυσης. Έστω ότι ακτινοβολουέμε ομοιόμορφα (με σωματιδιακή ακτινοβολία ή ακτίνες X ή γ) ένα υλικό μάζας m , τότε τα φωτόνια ή τα σωματίδια θα εναποθέσουν ενέργεια E στη μάζα του υλικού. Η απορροφούμενη δόση D εκφράζει το ποσό της ενέργειας της ιοντίζουσας ακτινοβολίας που έχει μεταδοθεί σε ένα υλικό στοιχειώδους όγκου και ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας E που απορροφήθηκε από το ακτινοβολούμενο υλικό προς τη μάζα του m :

$$D = \frac{E}{m}$$

Η μονάδα μέτρησης της ενέργειας είναι το Joule και της μάζας τα kg. Η μονάδα μέτρησης της απορροφούμενης δόσης D είναι το 1Grey (Gy) ,η οποία αποτελεί επίσημη μονάδα μέτρησης στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (S.I.) και ορίζεται ως η απορρόφηση ενέργειας 1 Joule ανά kg ακτινοβολούμενου υλικού (1 Joule/kg).

3.8.2 Έκθεση

Η έκθεση είναι η διαδικασία κατά την οποία ένα άτομο εκτίθεται σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Ειδικότερα, έκθεση είναι η μεταβίβαση της ενέργειας υπό μορφή είτε σωματιδιακής ή ηλεκτρομαγνητικής φύσεως ακτινοβολίας (σωμάτια ή φωτόνια) ικανής να παράγει άμεσα ή έμμεσα ιόντα.

Η έκθεση μπορεί να είναι εξωτερική από την κοσμική ακτινοβολία, τις ακτινογραφίες ή από τα ραδιοφάρμακα.²⁷ Στην Πυρηνική Ιατρική όπου εκτελούνται σπινθηρογραφήματα ο όρος «δόση» αναφέρεται στην ενέργεια που απορροφά το σώμα του εξεταζόμενου λόγω της εσωτερικής ακτινοβόλησης από το ραδιοϊσότοπο που του χορηγήθηκε. Αναλόγως με τη φύση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας και τον τρόπο έκθεσης

²⁷Το ραδιοφάρμακο είναι ένα φαρμακευτικό σκεύασμα που περιέχει ένα ραδιονουκλίδιο ή μια ραδιοεπισημασμένη ένωση με φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες κατάλληλες για ασφαλή και χρήσιμη χορήγηση στον ασθενή. Τα ραδιοφάρμακα καθώς χορηγούνται στον ανθρώπινο οργανισμό, συγκεντρώνονται εκλεκτικά σε ένα όργανο ή ιστό του σώματος όπου παραμένουν για μικρό ή μεγάλο χρονικό διάστημα που εξαρτάται από το χρόνο ημιζωής και τη φαρμακοκινητική τους. Τα ραδιοφάρμακα είτε δρουνε θεραπευτικά ή χρησιμοποιούνται για διαγνωστικούς σκοπούς. Πηγή από: Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής και άλλοι (2010), Μαθήματα Ακτινοπροστασίας για χειριστές ιατρικών μηχανημάτων ιοντίζουσών ακτινοβολιών, κεφάλαιο 10: σελίδα 76.

σε αυτήν, κατατάσσουμε την επικινδυνότητα ως εξής: σε εξωτερική ακτινοβολήση από φωτόνια, ηλεκτρόνια και σωματίδια α και σε εσωτερική ακτινοβολήση από σωματίδια α , ηλεκτρόνια και φωτόνια.

Στην περίπτωση της εξωτερικής ακτινοβολήσης, τα φωτόνια λόγω της μεγάλης διεισδυτικότητάς τους μπορούν να φτάσουν σε μεγάλο βάθος μέσα στο σώμα, να εναποθέσουν την ενέργειά τους και να προκαλέσουν πλήθος ιοντισμών. Σε αντίθεση με τα φωτόνια, τα ηλεκτρόνια έχουν μικρότερο βάθος διείσδυσης και μπορούν να προκαλέσουν μόνο επιφανειακές βλάβες. Τα σωματίδια α έχουν πολύ μικρή διεισδυτικότητα και απορροφώνται ακόμα και από τα ρούχα μας.

Το αντίστροφο ισχύει στην εσωτερική ακτινοβολήσης όπου τα σωματίδια α και τα ηλεκτρόνια εξαιτίας της μικρής διεισδυτικότητάς τους απορροφούνται τοπικά μέσα στα όργανα και καθίστανται δυνατόν να προκαλέσουν σημαντικές βλάβες. Όσον αφορά τα φωτόνια, μεγάλο ποσοστό τους μπορεί να διαφύγει από το σώμα χωρίς καν να αλληλεπιδράσει έστω μια φορά με αυτό.

Τα φωτόνια είναι λιγότερο επιβλαβή διότι δεν μπορούν να προκαλέσουν τόσο πυκνούς ιοντισμούς κατά την πορεία τους μέσα στο σώμα όσο τα σωματίδια α . Επομένως, τα φωτόνια είναι βιολογικά πιο ακίνδυνα. Παραδείγματος χάριν, αν ένας ιστός, όπως αυτός του θυρεοειδούς αδένου ακτινοβοληθεί με φωτόνια και απορροφήσει δόση 1 Gy και ένας άλλος θυρεοειδικός ιστός ακτινοβοληθεί με σωματίδια α και απορροφήσει την ίδια δόση τότε οι βιολογικές βλάβες στη δεύτερη περίπτωση θα είναι πολύ μεγαλύτερες.

Ως έκθεση ακτινοβολίας X ορίζεται το πηλίκο της απόλυτης τιμής του συνολικού φορτίου των ιόντων ενός σημείου dQ και του ίδιου πρόσημου θετικού ή αρνητικού, τα οποία παράγονται σε μάζα αέρα dm όταν όλα τα ιόντα (ηλεκτρόνια ή ποζιτρόνια) που ελευθερώνονται από την αλληλεπίδραση των φωτονίων σταματούν πλήρως στον αέρα, δια τη μάζα αυτή dm :

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

όπου dQ : το συνολικό φορτίο των ιόντων ενός σημείου

και dm : η μάζα του στοιχειώδους όγκου αέρα.

Η μονάδα μέτρησης της έκθεσης στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (S.I.) είναι το $1C/kg$, ωστόσο η μονάδα που χρησιμοποιείται συνήθως είναι το Röntgen $1R = 2,58 \cdot 10^{-4} C/kg$. Ο ορισμός ισχύει αποκλειστικά για τις ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες X και γ και η εφαρμογή του περιορίζεται σε πεδία ενέργειας μικρότερης των 3 MeV περίπου. Η έκθεση μετρά την ικανότητα των ακτίνων X και γ να ιονίζουν τον αέρα. Η άμεση μέτρηση

της έκθεσης επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός οργάνου που είναι γνωστό ως πρότυπος θάλαμος ιονισμού.

3.8.3 Ισοδύναμη δόση

Η ισοδύναμη δόση H_T ορίζεται ως το γινόμενο της απορροφούμενης δόση D σε έναν ιστό T επί το συντελεστή στάθμισης της ακτινοβολίας W_R για το είδος και την ποιότητα της ακτινοβολίας R :

$$H_T = D_T * W_R$$

Όπου D_T : η απορροφούμενη δόση στον ιστό T εξαιτίας ενός είδους ακτινοβολίας R και W_R : ο συντελεστής στάθμισης της ακτινοβολίας ή ο παράγοντας βαρύτητας ή ποιότητας της ακτινοβολίας R .

Η μονάδα μέτρησης της ισοδύναμης δόσης στο S.I. είναι το Sv (Sievert, σίβεργτ). Το 1Sv είναι μεγάλη σα μονάδα γι' αυτό συνήθως χρησιμοποιούνται υποπολλαπλάσια όπως το mSv. Αν και το Sv είναι ισοδύναμο του J/kg, χρησιμοποιείται μόνο για να δηλώσει ισοδύναμη δόση. Μερικές φορές χρησιμοποιείται η παλαιότερη ειδική μονάδα μέτρησης το rem (Röntgen equivalent man, ισοδύναμο του Röntgen στον άνθρωπο). Επομένως ισχύουν τα παρακάτω:

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$$

$$1 \text{ rem} = 0.01 \text{ Sv} = 0.01 \text{ J/kg}$$

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

Οι βιολογικές επιπτώσεις εξαρτώνται από την απορροφούμενη δόση του ιστού και από το είδος και την ποιότητα της ακτινοβολίας. Ίση ισοδύναμη δόση από διαφορετικά είδη ακτινοβολίας παράγει το ίδιο βιολογικό αποτέλεσμα. Αν και η ισοδύναμη δόση λαμβάνει υπόψιν τη διαφορετική επίδραση των διαφόρων ειδών ακτινοβολίας σε έναν ιστό, δε λαμβάνει υπόψιν τη διαφορετική απόκριση (ευαισθησία) κάθε ιστού σε αυτήν.

3.8.4 Ενεργός δόση

Το 1990 η Διεθνής Επιτροπή Ακτινολογικής προστασίας (ICRP, International Commission on Radiological Protection) εισήγαγε την έννοια της ενεργού δόσης E_{eff} (Effective dose) για την εκτίμηση της συνολικής επιβάρυνσης της υγείας του ανθρώπου από την ακτινοβολία ενός ή περισσότερων οργάνων ή ιστών. Η ενεργός δόση υπολογίζεται ως ο σταθμισμένος μέσος όρος της μέσης απορροφούμενης δόσης στα διάφορα όργανα και ιστούς του σώματος, όπου ο συντελεστής στάθμισης είναι η βλάβη

που προκαλεί η ακτινοβολία σε ένα δεδομένο όργανο (από ακτινοβόληση ολόκληρου του σώματος) ως κλάσμα της συνολικής βλάβης της ακτινοβολίας.

Οι διάφοροι ανθρώπινοι ιστοί για δεδομένη ισοδύναμη δόση H_T συντελούν με διαφορετική βαρύτητα στο συνολικό κίνδυνο που διατρέχει από την ακτινοβόλησή τους η υγεία του ανθρώπου. Η ενεργός δόση ορίζεται ως το άθροισμα των γινομένων της ισοδύναμης δόσης που έλαβε κάθε ιστός T επί έναν συντελεστή W_T που εξαρτάται από το είδος του ιστού:

$$E_{\text{eff}} = \sum H_T * W_T$$

όπου W_T : ο συντελεστής στάθμισης για τον ιστό T , ο οποίος παίρνει διάφορες τιμές ανάλογα με το είδος του ιστού που ακτινοβολείται

Η μονάδα μέτρησης της ενεργού δόσης είναι το Sv . Στη χώρα μας, για διάφορες εξετάσεις της Πυρηνικής ιατρικής σε ενήλικες οι τιμές της ενεργού δόσης κυμαίνονται από 0,3 mSv έως 25 mSv.

Αν ακτινοβληθούν περισσότερα από ένα όργανο, τότε υπολογίζουμε τη συνολική επιβάρυνση προσθέτοντας την ενεργό δόση που έλαβε το καθένα από αυτά. Σε αυτήν την περίπτωση, η ενεργός δόση είναι το άθροισμα των σταθμισμένων ισοδύναμων δόσεων από εσωτερική και εξωτερική ακτινοβόληση σε όλους τους ιστούς και τα όργανα:

$$E_{\text{eff}} = \sum W_T * H_T = \sum W_T * [\sum W_R * D_T]$$

Η ενεργός δόση χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του κινδύνου στην ακτινολογία και στην πυρηνική ιατρική, για σύγκριση δόσεων, για δοσιμετρική βελτιστοποίηση των εξετάσεων, για σύγκριση με εναλλακτικές διαγνωστικές τεχνικές και με τα επίπεδα της φυσικής ακτινοβολίας. Όλοι οι κανονισμοί ακτινοπροστασίας εκφράζουν τα όρια δόσης σε μονάδες ενεργού δόσης. Η ισοδύναμη δόση λαμβάνει υπόψιν το είδος της ακτινοβολίας ενώ η ενεργός δόση συνεκτιμά τόσο το είδος της ακτινοβολίας όσο και το είδος του ιστού ή του οργάνου που ακτινοβολείται.

Η ολόσωμη δόση είναι η συνολική ενέργεια που εναποτίθεται στο σώμα δια τη συνολικής μάζας του σώματος χωρίς να γίνεται στάθμιση για τα διάφορα όργανα. Η δόση δέρματος ορίζεται ως η ενεργός δόση η οποία απορροφάται σε βάθος 0,07 mm από την επιφάνεια του δέρματος κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης. Η δόση δέρματος αποτελεί

δείκτη επιβάρυνσης του δέρματος και εργαλείο για τον υπολογισμό με μαθηματικές μεθόδους της συνολικής δόσης που έλαβε ο εξεταζόμενος.

3.9 Ανακεφαλαίωση

Η δοσιμετρική ανάλυση της ακτινοβολίας με τις ποσοτικές μετρήσεις και τους υπολογισμούς είναι κρίσιμη για την εκτίμηση των κινδύνων από τη χρήση των ιοντιζουσών ακτινοβολιών. Η δοσιμετρία αποτελεί βασικό εργαλείο στην ακτινοθεραπεία όπου ακτινοβολούνται στοχευμένα τα καρκινικά κύτταρα των ιστών και πρέπει να παρέχεται επαρκής δόση σε αυτά, χωρίς όμως να χορηγείται πολύ μεγάλη δόση σε άλλα μέρη του σώματος.²⁸

Η ανάγκη για τον ακριβή υπολογισμό της δόσης των ιοντιζουσών ακτινοβολιών γεννήθηκε όταν έγιναν αντιληπτές οι επιβλαβείς επιδράσεις των ακτινοβολιών. Ο στόχος της ακτινοπροστασίας είναι να μηδενίσει τα αιτιοκρατικά (καθορισμένα)-μη χρήσιμα αποτελέσματα των ακτινοβολιών και να ελαχιστοποιήσει τα τυχαία (στοχαστικά). Τα αιτιοκρατικά αποτελέσματα παρουσιάζονται με την υπέρβαση μιας ορισμένης τιμής δόσης, που ονομάζεται δόση κατωφλίου και η σοβαρότητά τους αυξάνει με την αύξηση της δόσης. Απεναντίας, τα τυχαία αποτελέσματα εμφανίζονται από πολύ μικρές δόσεις και η σοβαρότητά τους δε σχετίζεται με την αύξηση της δόσης.

Στις μέρες μας, στις διαγνωστικές εξετάσεις δεν παρατηρούνται αιτιοκρατικά αποτελέσματα από τη χρήση ιοντιζουσών ακτινοβολιών. Η αδιάκοπη προσπάθεια για τη μείωση της απορροφούμενης δόσης τόσο χαμηλά όσο αυτό είναι εφικτό έχει απόρροια την εντυπωσιακή μείωση της με την πάροδο του χρόνου. Συγκεκριλαιώνοντας, η δοσιμετρική μελέτη κάθε ιατρικής πράξης με χρήση ιοντιζουσών ακτινοβολιών είναι

²⁸Η Ακτινοθεραπεία είναι μια μέθοδος όπου χρησιμοποιούνται ιοντίζουσες ακτινοβολίες (φωτόνια, ηλεκτρόνια, πρωτόνια) με σκοπό την ίαση ή την ανακούφιση νεοπλασματικών νοσημάτων με παράλληλη προφύλαξη των γειτονικών φυσιολογικών ιστών. Η Ακτινοθεραπεία επιτυγχάνεται με τη χρήση ραδιενεργών πηγών, κυρίως με ακτινοβολία γ και σπανιότερα β και με τον γραμμικό επιταχυντή. Ο γραμμικός επιταχυντής είναι ένα μηχάνημα που παράγει ακτινοβολία γ από την πρόσκρουση ηλεκτρονίων σε συγκεκριμένα υλικά. Η παραγόμενη ακτινοβολία σχηματίζει ιόντα και εναποθέτει ενέργεια στα κύτταρα των ιστών από τους οποίους διέρχεται. Η ενέργεια αυτή μπορεί να καταστρέψει τα καρκινικά κύτταρα ή να τους προκαλέσει γενετικές αλλαγές που τα οδηγούν στον κυτταρικό θάνατο. Η ακτινοβολία βλάπτει και τα υγιή κύτταρα ωστόσο οι συνεχείς βελτιώσεις των χρησιμοποιούμενων τεχνικών ακτινοβολήσης και του υπολογισμού της κατανομής της δόσης (treatment planning) περιορίζουν όλο και περισσότερο τις βλάβες των υγιών ιστών. Πηγή από: Κουτρομπής Π. Γεώργιος (2003), Ακτινοφυσική 1, Κεφάλαιο 5, ενότητα 3, σελ. 128-130 και ενότητα 4, σελ. 136-137.

μείζονος σημασίας επειδή το όφελος του εξεταζόμενου πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερο από τον κίνδυνο εξαιτίας της έκθεσης στην ακτινοβολία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΡΑΔΙΟΒΙΟΛΟΓΙΑ-ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΙΟΝΤΙΖΟΥΣΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Η ιοντίζουσα ακτινοβολία έχει μελετηθεί επαρκώς από τους ερευνητές για τις βιολογικές της επιδράσεις. Όλοι οι ενεργοί πολίτες θα πρέπει να είναι ενημερωμένοι για την επικινδυνότητα των ακτινογραφιών (ακτίνες X) και της ραδιενέργειας (ακτινοβολία α , β , γ και X). Κατά τον 20^ο και 21^ο αιώνα σημειώθηκαν ιστορικές καταστροφές από ρίψη ατομικών βομβών, όπως αυτές στη Χιροσίμα και στο Ναγκασάκι της Ιαπωνίας και από πυρηνικά ατυχήματα, όπως αυτό στον πυρηνικό σταθμό του Τσερνόμπιλ στην Ουκρανία και στον πυρηνικό σταθμό της Φουκουσίμα στην Ιαπωνία.

Ο κλάδος της Ραδιοβιολογίας αποτελεί συγχώνευση των κλάδων της φυσικής των ακτινοβολιών (Ακτινοφυσική) και της βιολογίας. Ο σκοπός της Ραδιοβιολογίας είναι να εξετάσει τις επιπτώσεις της ιοντίζουσας ακτινοβολίας στους έμβιους οργανισμούς. Η ραδιοβιολογία παρέχει τη βασική σχέση μεταξύ των μικροσκοπικών και μοριακών αλληλεπιδράσεων της ακτινοβολίας με τον ιστό.

Ο μηχανισμός που οδηγεί σε οποιοδήποτε είδος βιολογικού αποτελέσματος εκκινεί με την απορρόφηση ενέργειας κατά την αλληλεπίδραση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας με τα άτομα της ύλης. Ανεξαρτήτως του είδους της ιονίζουσας ακτινοβολίας, η απορρόφηση της ενέργειας μπορεί να προκαλέσει ιοντισμούς και διεγέρσεις των ατόμων.

Από ποσοτικής απόψεως, το ποσό της ενέργειας που απορροφάται και εκδηλώνεται τελικά με τη μορφή θερμότητας είναι σχετικά μικρό και ακίνδυνο βιολογικά. Εντούτοις, από ποιοτικής απόψεως, το ποσό της ενέργειας που θα απορροφηθεί μέσω ιοντισμών, μπορεί να προκαλέσει μια ποικιλία χημικών μεταβολών. Το ποσό της ενέργειας που εκδηλώνεται με μορφή θερμότητας είναι πολύ μικρό για να δώσει μετρήσιμη μεταβολή της θερμοκρασίας και γι' αυτό το λόγο προκειμένου να ανιχνευθούν οι ιοντίζουσες ακτινοβολίες απαιτούνται έμμεσοι τρόποι μέτρησης, όπως η μέτρηση του ιοντισμού, δηλαδή του φορτίου.

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε τη δομή και τη διαίρεση του κυττάρου, τη βιολογική δράση των ιοντιζουσών ακτινοβολιών στο κύτταρο και τη διαίρεση των βιολογικών επιδράσεων στο κύτταρο. Επιπρόσθετα, θα αναπτύξουμε τα καθορισμένα (αιτιοκρατικά) και τα στοχαστικά (απώτερα, τυχαία) αποτελέσματα. Εν κατακλείδι, θα αναλύσουμε διεξοδικά τους ανιχνευτές της ιοντίζουσας ακτινοβολίας.

4.2 Η κυτταρική δομή και η διαίρεση

Τα κύτταρα αποτελούν τους δομικούς λίθους της έμβιας ύλης κατά τον ίδιο τρόπο που τα άτομα συνθέτουν τους βασικούς δομικούς λίθους της ύλης. Το κύτταρο είναι η βάση της δομικής και λειτουργικής οργάνωσης ενός οργανισμού. Ειδικότερα, όμοια κύτταρα συνδέονται μεταξύ τους για το σχηματισμό ιστού, διαφορετικοί ιστοί συνδυάζονται προκειμένου να σχηματίσουν ένα όργανο, διαφορετικά όργανα συνεργάζονται για να αποτελέσουν ένα σύστημα που επιτελεί μια συγκεκριμένη λειτουργία του οργανισμού και τελικά όλα τα συστήματα μαζί δημιουργούν έναν οργανισμό.

Τα κύτταρα ενός οργανισμού παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλομορφία: οι διαφορές στη μορφολογία τους οφείλονται στις διαφορές στη λειτουργία τους, καθώς διαφορετικά κύτταρα επιτελούν διαφορετικές λειτουργίες. Κάθε λειτουργία του ανθρώπινου σώματος προκύπτει από τις επιμέρους λειτουργίες μεμονωμένων κυττάρων ή ομάδων κυττάρων. Τα κύτταρα κινούνται, αυξάνονται, αλληλεπιδρούν, αυτοπροστατεύονται, ρυθμίζουν διαδικασίες και αναπαράγονται. Επομένως, η σωστή λειτουργία τους εξασφαλίζει τη σωστή λειτουργία όλου του οργανισμού.

Το κύτταρο αποτελείται από οργανικά και ανόργανα συστατικά: υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λιπίδια, νουκλεϊνικά οξέα δηλαδή το DNA και το RNA και ανόργανες ενώσεις όπως τα οξέα και οι βάσεις.²⁹ Το νερό είναι η κυριότερη ανόργανη χημική ένωση που εμπεριέχεται στο κύτταρο.

²⁹Ο όρος «DNA» αποτελεί συντομογραφία του deoxyribonucleic acid, δεοξυριβονουκλεϊκό οξύ στα ελληνικά και είναι ένα μακρομόριο (μεγάλο μόριο) που αποτελείται από δύο αλυσίδες που τυλίγονται η μία γύρω από την άλλη σχηματίζοντας μια διπλή έλικα η οποία φέρει γενετικές πληροφορίες για την ανάπτυξη, τη λειτουργία και την αναπαραγωγή των οργανισμών. Το RNA (συντομογραφία του ribonucleic acid, ριβονουκλεϊκό οξύ στα ελληνικά) είναι επίσης ένα μακρομόριο το οποίο αποτελείται από μονομερή νουκλεοτίδια που διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαδικασία της μετάφρασης του γενετικού κώδικα από το DNA σε πρωτεϊνικά προϊόντα. Το RNA είναι ο αγγελιοφόρος (mRNA, messenger RNA) μεταξύ του DNA και των πρωτεϊνικών συμπλεγμάτων που είναι γνωστά ως ριβοσώματα στο κυτταρόπλασμα του κυττάρου. Το DNA και το RNA είναι οργανικές χημικές ενώσεις, δηλαδή περιέχουν άνθρακα. Πηγή από: Γιαννακούρης Ν. και άλλοι. (2015), Οδηγός εργαστηριακών και φροντιστηριακών ασκήσεων βιολογίας, σελ. 129-130.

Το κύτταρο δομείται από μια συστηματικά οργανωμένη ομάδα μορίων που βρίσκονται σε δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ τους και είναι ανεξάρτητο ως προς την αυτορρύθμιση και την προσαρμοστικότητα του σε σχέση με το περιβάλλον.³⁰ Εξωτερικά, το κύτταρο περιβάλλεται από την κυτταρική μεμβράνη ή πλασματική μεμβράνη, η οποία το ξεχωρίζει από το περιβάλλον του. Στο κέντρο του κυττάρου βρίσκεται ο πυρήνας ο οποίος ελέγχει την κυτταρική διαίρεση, τον πολλαπλασιασμό και τις βιοχημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται σε αυτό.

Μεταξύ της εσωτερικής επιφάνειας της κυτταρικής μεμβράνης και της εξωτερικής επιφάνειας της μεμβράνης του πυρήνα παρεμβάλλεται το κυτταρόπλασμα. Τα κυριότερα συστατικά του κυτταροπλάσματος είναι ένα παχύρρευστο υλικό που ονομάζεται κυτοσόλη και τα οργανίδια (εσωτερικές υπομονάδες του κυττάρου) τα οποία επιτελούν τις λειτουργίες του κυττάρου. Το κυτταρόπλασμα αναπληρώνει τον κενό χώρο του κυττάρου, συγκρατώντας και προστατεύοντας τα οργανίδια του.

Ο πυρήνας συνίσταται από DNA και μεγάλα ποσά RNA. Το DNA στο μικροσκόπιο έχει τη μορφή διπλής έλικας ή περιστρεφόμενης σκάλας. Ο γενετικός κώδικας βρίσκεται στην αλληλουχία των νουκλεοτιδικών βάσεων που είναι η αδενίνη, η κυτοσίνη, η γουανίνη και η θυμίνη (A, C, G και T αντίστοιχα) κατά μήκος του μορίου DNA.³¹ Συγκεκριμένα, η καθεμία από τις δύο έλικες του DNA αποτελείται από το συνδυασμό των τεσσάρων νουκλεοτιδικών βάσεων. Τα «σκαλιά» είναι οι δεσμοί που αναπτύσσονται μεταξύ των γειτονικών βάσεων. Κατά αυτόν τον τρόπο σχηματίζονται οι δυο πολυνουκλεοτιδικές έλικες-αλυσίδες του DNA. Μέσα στον πυρήνα, το δίκλωνο μόριο DNA είναι πακεταρισμένο με ειδικές πρωτεΐνες και βασικός του ρόλος είναι η μεταφορά της γενετικής πληροφορίας και η καθοδήγηση της διαδικασίας παραγωγής πρωτεϊνών. Η αποκωδικοποίηση του DNA, δηλαδή η αποσαφήνιση του τρόπου με τον οποίο η δομή του καθορίζει συγκεκριμένες γενετικές επιλογές, συνέβαλλε στην ορθότερη κατανόηση της γενετικής της ζωής και της κληρονομής ορισμένων χαρακτηριστικών και νόσων.

³⁰Το «μόριο» είναι το ελάχιστο συστατικό ενός στοιχείου ή μιας ένωσης που δύναται να υπάρξει σε ελεύθερη κατάσταση διατηρώντας τις χημικές ιδιότητες των μερών του στοιχείου ή της ένωσης που το αποτελούν. Πηγή από: Σπηλιόπουλος Ιωακείμ και άλλοι (2015), Χημεία, κεφ. 1, σελ. 17.

³¹Γενικά, «κώδικα» ονομάζουμε μια ομάδα κανόνων μέσω της οποίας η πληροφορία που βρίσκεται σε ένα αντικείμενο μεταφέρεται σε ένα άλλο. Ο «γενετικός κώδικας» είναι εκείνη η ομάδα κανόνων μέσω της οποίας η πληροφορία, κωδικοποιημένη στο γενετικό υλικό της ζωής μεταγράφεται σε πρωτεΐνες αφού πρωτίστως μεταγραφεί σε αγγελιοφόρο RNA (σε νέες ακολουθίες βάσεων). Πηγή: <http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGL-C112/52/390,1505/>

Τα κύτταρα διαιρούνται ακατάπαυστα για να αυξήσουν ή/ και να αναπληρώσουν τον πληθυσμό τους. Οι μονοκύτταροι οργανισμοί με την κυτταρική διαίρεση επιτυγχάνουν την αύξηση του ολικού αριθμού των ατόμων ενός πληθυσμού.³² Η διαδικασία της κυτταρικής διαίρεσης είναι εξαιρετικής σημασίας για την επιβίωση των πολυκύτταρων οργανισμών καθώς όχι μόνο αυξάνεται ο αριθμός των κυττάρων αλλά και αντικαθίστανται τα κατεστραμμένα κύτταρα.³³ Οι δύο βασικές διεργασίες πολλαπλασιασμού των κυττάρων είναι η μίτωση ή μιτωτική διαίρεση και η μείωση.

Κατά τη διεργασία της μίτωσης ο πυρήνας του κυττάρου διαιρείται με σκοπό τη διατήρηση του γενετικού υλικού με απόρροια τη σταθερότητα των οργανισμών. Στη μίτωση το μητρικό κύτταρο χωρίζεται σε δύο όμοια με αυτό κύτταρα (θυγατρικά). Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται σε τέσσερα στάδια: στην πρόφαση, στη μετάφαση, στην ανάφαση και στην τελόφαση. Όσο διαρκεί η διαίρεση το DNA βρίσκεται πακεταρισμένο στα χρωμοσώματα, όμως με το πέρας της διαίρεσης το μητρικό και το θυγατρικό κύτταρο έχουν τον ίδιο αριθμό χρωμοσωμάτων.³⁴

Στη μείωση ο πυρήνας διαιρείται αποσκοπώντας στη μείωση του γενετικού υλικού στο μισό σε οργανισμούς που αναπαράγονται φυλετικά. Η γενετική πληροφορία μεταδίδεται από το μητρικό κύτταρο στο θυγατρικό. Το αποτέλεσμα της μείωσης είναι η παραλλακτικότητα και η γενετική ποικιλότητα των οργανισμών. Εντούτοις, σε περίπτωση που κάτι δεν πάει καλά στη διεργασία αυτή, τότε το θυγατρικό κύτταρο θα είναι δυσλειτουργικό ή νεκρό. Επιπρόσθετα, αν το μητρικό κύτταρο είναι μεταλλαγμένο, τότε το θυγατρικό θα είναι κι αυτό μεταλλαγμένο καθότι αποτελεί πιστό αντίγραφο του.

³²Μονοκύτταροι ονομάζονται οι ζωντανοί οργανισμοί που αποτελούνται από ένα μόνο κύτταρο, όπως οι μύκητες και τα πρωτόζωα. Το μοναδικό αυτό κύτταρο θα πρέπει να εκτελεί όλες τις διεργασίες ζωής για να επιζήσει. Ένα βασικό τους χαρακτηριστικό είναι ότι δεν έχουν πυρήνα (προκαρυώτες ή προκαρυωτικά κύτταρα). Πηγή από: Γιαννακούρης Ν. και άλλοι (2015), Οδηγός εργαστηριακών και φροντιστηριακών ασκήσεων βιολογίας, σελ. 25, 26, 28 και 29.

³³Πολυκύτταροι καλούνται οι οργανισμοί οι οποίοι αποτελούνται από περισσότερα από ένα κύτταρο. Σε αυτούς εντάσσονται όλα τα είδη φυτών και ζώων. Τα κύτταρα των πολυκύτταρων οργανισμών διαθέτουν στο κέντρο τους πυρήνα (ευκαρυώτες ή ευκαρυωτικά κύτταρα) και πολλαπλασιάζονται, τροποποιούνται, οργανώνονται σε ομάδες και εξειδικεύονται σε συγκεκριμένες λειτουργίες. Πηγή από: Γιαννακούρης Ν. και άλλοι (2015), Οδηγός εργαστηριακών και φροντιστηριακών ασκήσεων βιολογίας, σελ. 25, 26, 30 και 31.

³⁴Τα χρωμοσώματα είναι μια οργανωμένη νηματοειδής δομή DNA και πρωτεϊνών που βρίσκεται στα κύτταρα. Τα περισσότερα κύτταρα διαθέτουν 46 χρωμοσώματα. Τα χρωμοσώματα κληρονομούνται από τους γονείς, 23 από τη μητέρα και 23 από τον πατέρα. Ως εκ τούτου, έχουμε δύο ομάδες 23 χρωμοσωμάτων, δηλαδή 23 ζεύγη. Πηγή από: Γιαννακούρης Ν. και άλλοι (2015), Οδηγός εργαστηριακών και φροντιστηριακών ασκήσεων βιολογίας, σελ. 105.

Αναλυτικότερα, τα κύτταρα στο σώμα μας αντιγράφουν το γενετικό τους υλικό (DNA) που θα περάσει στους απογόνους τους και ύστερα πεθαίνουν. Ένα κύτταρο του οποίου το λειτουργικό DNA του έχει υποστεί βλάβη δε θα μπορέσει να παράγει βιώσιμα θυγατρικά κύτταρα διότι το λειτουργικό DNA καθορίζει ποιά πρωτεΐνη θα παράγει το κύτταρο. Αν πεθάνει ένας μεγάλος αριθμός κυττάρων τότε θα υπάρξει απώλεια της λειτουργίας του αντίστοιχου οργάνου. Πάραυτα, το κύτταρο διαθέτει μηχανισμούς επιδιόρθωσης του γενετικού υλικού προς αποφυγή αλλοιώσεων στη δομή του DNA. Οι νουκλεοτιδικές βάσεις από τις οποίες αποτελούνται οι δύο έλικες του DNA είναι συμπληρωματικές ανά δύο, για την ακρίβεια η αδενίνη θα ενώνεται μέσω δεσμών υδρογόνου πάντα με τη θυμίνη και η γουανίνη θα ενώνεται πάντα με την κυτοσίνη. Επομένως, οι δύο έλικες του DNA είναι συμπληρωματικές μεταξύ τους και καθίσταται εφικτό όταν ένα μέρος του ενός σκέλους υποστεί ζημιά να μπορεί να επιδιορθωθεί με γνώμονα το αντίστοιχο κομμάτι του άλλου σκέλους. Παρ' όλα αυτά οι μηχανισμοί επιδιόρθωσης δεν είναι αλάθητοι και όταν κάποια κομμάτια δεν αποκατασταθούν, προκαλείται μετάλλαξη του γενετικού υλικού που μπορεί να προβεί και μοιραία.

Η μίτωση και η μείωση αποτελούν μέρος του κύκλου ζωής ενός κυττάρου. Κάθε φορά που το κύτταρο διαιρείται είτε με τον έναν είτε με τον άλλο τρόπο περνά από μια σειρά διαδοχικών φάσεων κατά τις οποίες συμβαίνουν διάφορα γεγονότα. Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από τη δημιουργία ενός κυττάρου ως τότε που και το ίδιο θα παράγει τους απογόνους του καλείται «κυτταρικός κύκλος». Ο κυτταρικός κύκλος αν και αποτελεί μια συνεχή διαδοχή γεγονότων, διακρίνεται σε δύο φάσεις: στη μεσόφαση και στη μίτωση.

Η μεσόφαση παρεμβάλλεται σε δύο διαδοχικές μιτωτικές διαιρέσεις και αντιπροσωπεύει το 90-95% της διάρκειας του κυτταρικού κύκλου. Η μεσόφαση συνιστά μια περίοδο αύξησης του όγκου του κυττάρου και ταυτόχρονα προετοιμασίας του για την επικείμενη διαίρεσή του. Η μεσόφαση υποδιαιρείται στα στάδια: G₁, S, G₂. Στο στάδιο G₁, που διαρκεί περισσότερο από τα άλλα δύο, γίνεται η βιοσύνθεση του αγγελιοφόρου RNA (mRNA), tRNA, ριβοσωμάτων και πρωτεϊνών (δομικών και λειτουργικών). Τα ριβοσώματα είναι μικρά κυτταρικά σωματίδια που συμβάλλουν στη σύνθεση των πρωτεϊνών. Στο στάδιο S, το μικρότερο σε διάρκεια, το κύτταρο διπλασιάζει την ποσότητα του γενετικού του υλικού. Τέλος, το στάδιο G₂ είναι μια μεταβατική περίοδος πριν από την έναρξη της μιτωτικής διαίρεσης.

4.3 Η βιολογική δράση των ιοντιζουσών ακτινοβολιών στο κύτταρο

Το βιολογικό αποτέλεσμα της επίδρασης της ιοντίζουσας ακτινοβολίας με την οργανική ύλη εξαρτάται από την απορροφούμενη δόση: οι επιστήμονες αναζητούν ένα κατώφλι δόσης τέτοιο ώστε τα επίπεδα δόσης κάτω από αυτό να μην προκαλούν βιολογικές αντιδράσεις. Επιπλέον, συνάρτηση της βιολογικής δράσης της ιοντίζουσας ακτινοβολίας με την έμβια ύλη αποτελεί και ο ρυθμός δόσης (η ενέργεια που καταβάλλεται ανά μονάδα χρόνου και μετράται σε mGy/hr): το ίδιο ποσό δόσης όταν αποδίδεται σε μικρό χρονικό διάστημα προκαλεί σοβαρότερο βιολογικό αποτέλεσμα σε σύγκριση με την ακτινοβολήση για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Εντέλει, ο όγκος του υπό ακτινοβολήση ιστού και οι ιδιότητές του συμβάλλουν στο βιολογικό αποτέλεσμα της επίδρασης της ιοντίζουσας ακτινοβολίας με την οργανική ύλη.

Αρχικά οι ιοντίζουσες ακτινοβολίες αλληλεπιδρούν με το νερό καθότι αυτό συνιστά το βασικό συστατικό των κυττάρων (κατά προσέγγιση 75-85% νερού σε κάθε κύτταρο). Τα σημαντικότερα στάδια αλληλεπίδρασης της ιοντίζουσας ακτινοβολίας με το βιολογικό υλικό είναι: το φυσικό, το φυσικό-χημικό, το χημικό, το βιοχημικό, το κυτταρικό και το συστηματικό ή συστηματικό στάδιο.

Κατά το φυσικό στάδιο προκαλείται ιοντισμός ή διέγερση των ατόμων της οργανικής ύλης. Κατά τη διέγερση ηλεκτρόνια μεταπηδούν σε τροχιές υψηλότερης ενέργειας και κατά τον ιοντισμό εκτινάσσονται από το άτομο δευτερεύοντα ηλεκτρόνια. Στο φυσικό-χημικό στάδιο τα δευτερεύοντα ηλεκτρόνια προκαλούν ιοντισμούς κατά την πορεία τους με αποτέλεσμα την παραγωγή διεγερμένων μορίων και χημικών οντοτήτων όπως οξειδωτικοί παράγοντες και ελεύθερες ρίζες. Οι ελεύθερες ρίζες είναι ουδέτερα άτομα ή μόρια που φέρουν ένα αζευγάρωτο-ασύζευκτο τροχιακό ηλεκτρόνιο στην εξωτερική τους στοιβάδα.³⁵ Στο χημικό στάδιο τα παραπάνω προϊόντα προσβάλλουν το DNA και το RNA με απόρροια χημικές μεταβολές και βλάβες στο υλικό των χρωμοσωμάτων (χρωμοσωματικές ανωμαλίες).

³⁵Το αζευγάρωτο-ασύζευκτο τροχιακό ηλεκτρόνιο (μονήρες) είναι ένα ηλεκτρόνιο που κινείται μόνο του σε τροχιά γύρω από τον πυρήνα του ατόμου. Ένα τροχιακό ηλεκτρόνιο δεν περιφέρεται μόνο γύρω από τον πυρήνα ενός ατόμου αλλά επίσης περιστρέφεται γύρω από το δικό του άξονα. Σε ένα άτομο με ζυγό αριθμό ηλεκτρονίων οι περιστροφές των ηλεκτρονίων εξισορροπούνται να δύο. Τούτο σημαίνει ότι για κάθε ηλεκτρόνιο που περιστρέφεται με τη φορά των δεικτών του ρολογιού, υπάρχει ένα δεύτερο που περιστρέφεται αντίστροφα κι αυτό εξασφαλίζει μια κατάσταση υψηλού βαθμού χημικής σταθερότητας. Στην περίπτωση των ελευθερών ριζών όπου υπάρχει ένα μόνο ηλεκτρόνιο στην εξωτερική στοιβάδα του ατόμου, η κατάσταση χαρακτηρίζεται από υψηλού βαθμού χημικής αστάθειας. Εκ του αποτελέσματος, οι ελεύθερες ρίζες είναι βραχύβιες και εξαιρετικά δραστικές. Πηγή από: Δεμάδης Κωνσταντίνος (2009), Δομή των μορίων, σελ. 1-2, Τμήμα Χημείας, Πανεπιστήμιο Κρήτης.

Κατά το βιοχημικό στάδιο παρατηρούνται ενζυμικές αντιδράσεις και αναγνώριση και επιδιόρθωση των βλαβών.³⁶ Στο κυτταρικό στάδιο οι χημικές αλλαγές προκαλούν τη μεταβολή της δομής ή της λειτουργικότητας των κυττάρων οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν στον πρόωρο θάνατο αυτών (κυτταρικός θάνατος), στην παρεμπόδιση ή καθυστέρηση του κυτταρικού πολλαπλασιασμού και σε τροποποιήσεις (γονιδιακές μεταλλάξεις) που μεταφέρονται από τα μητρικά στα θυγατρικά κύτταρα λόγω του ότι τα δεύτερα είναι πιστά αντίγραφα των πρώτων. Στο τελευταίο στάδιο το συστηματικό ή συστηματικό εμφανίζονται τα ορμονικά αποτελέσματα, οι ανοσολογικές αντιδράσεις, οι βλάβες των αγγείων, οι λειτουργικές βλάβες και η καρκινογένεση της βιολογικής επίδρασης της ιονίζουσας ακτινοβολίας.

Τα κύτταρα, όπως προαναφέρθηκε, είναι ικανά να αποκαθιστούν τις βλάβες. Επομένως, δεν είναι όλα τα αποτελέσματα της ιονίζουσας ακτινοβολίας μη αναστρέψιμα. Ωστόσο, αν η ζημιά που έχει υποστεί το κύτταρο είναι σοβαρή τότε αυτό πεθαίνει. Κάποιες φορές, αν και τι κύτταρο έχει καταστραφεί, εξακολουθεί να αναπαράγει. Ένα άλλο πιθανό αποτέλεσμα της έκθεσης στην ακτινοβολία είναι ότι το κύτταρο επηρεάζεται έτσι ώστε να μην πεθαίνει αλλά να μεταλλάσσεται. Όπως προαναφέρθηκε, οι ανεπιτυχώς επιδιορθωμένες βλάβες του DNA επιφέρουν μετάλλαξη. Το μεταλλαγμένο κύτταρο αναπαράγει και διαιωνίζει τη μετάλλαξη (γονιδιακές μεταλλάξεις). Κατά αυτόν τον τρόπο μπορεί να δημιουργηθεί ένας κακοήθης όγκος.

Η ακτινοευαισθησία των διαφόρων οργάνων του ανθρώπου συνδέεται με τη σχετική ευαισθησία των κυττάρων από τα οποία συνίστανται. Ειδικότερα, ακτινοευαίσθητα κύτταρα είναι αυτά που χαρακτηρίζονται από ρυθμό ταχείας αναπαραγωγής, λόγω χάρη τα αιμοποιητικά όργανα. Ένας ακόμη παράγοντας υψηλής ακτινοευαισθησίας των κυττάρων είναι ο ρυθμός ταχείας αναγέννησης σε συνδυασμό με την έντονη παρουσία οξυγόνου. Τα καρκινικά κύτταρα αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα κυττάρων που αναγεννώνται ταχέως και ταυτόχρονα έχουν καλή παροχή αίματος και οξυγόνου κι αυτό τα καθιστά πολύ ευαίσθητα στην ιονίζουσα ακτινοβολία. Επιπρόσθετα, το αναπτυσσόμενο έμβρυο διακρίνεται από υψηλή ακτινοευαισθησία εξαιτίας του κυτταρικού του συστήματος που αποτελείται από ταχέως διαχωρισμένα κύτταρα με παράλληλα καλή τροφοδοσία αίματος και οξυγόνου.

4.4 Η διαίρεση των βιολογικών επιδράσεων στο κύτταρο

³⁶ Ενζυμα καλούνται οι ειδικές πρωτεΐνες που δρουν ως καταλύτες (αυξάνουν την ταχύτητα) στις χημικές αντιδράσεις, βασικές για τη λειτουργία των οργανισμών. Πηγή από: Σπηλιόπουλος Ιωακείμ και άλλοι, Χημεία (2015), κεφάλαιο 23, σελ.354.

Οι βλάβες που προξενεί η ιοντίζουσα ακτινοβολία στον πυρήνα του κυττάρου είναι οι πιο βαρυσήμαντες και ταξινομούνται σε άμεση και έμμεση επίδραση αυτής. Ο όρος «άμεση επίδραση της ιονίζουσας ακτινοβολίας» αναφέρεται στις αλληλεπιδράσεις της με άτομα σημαντικών οργανικών πολυμερών μορίων του κυττάρου όπως τις ενζυμικές και δομικές πρωτεΐνες, το RNA και κυρίως το DNA.

Τα σωματίδια της ακτινοβολίας αλληλεπιδρούν με το DNA προκαλώντας το σπάσιμο της μιας από τις δύο πολυνουκλεοτιδικές αλυσίδες του γενετικού υλικού ή/και την καταστροφή της μεμβράνης που περιβάλλει τον πυρήνα. Η άμεση δράση στα οργανικά μόρια επιφέρει τη θραύση των χημικών δεσμών με συνέπεια την παραγωγή ελεύθερων οργανικών ριζών οι οποίες κατά τη διάχυσή τους μπορεί να συνδεθούν μεταξύ τους ή τη διάσπαση του οργανικού μορίου σε δύο μικρότερα σταθερά.³⁷ Αν παραδείγματος χάριν το ιόν που θα σχηματιστεί από την δράση της ιονίζουσας ακτινοβολίας αλληλεπιδράσει με μια πρωτεΐνη τότε μπορεί να αλλάξει το σχήμα της ή να σπάσουν οι δεσμοί που τη συγκροτούν καθιστώντας την μη λειτουργική. Σε κάθε περίπτωση τα νέα μόρια που θα προκύψουν θα φέρουν διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες από τα αντίστοιχα αρχικά.

Με τον όρο «έμμεση επίδραση της ιονίζουσας ακτινοβολίας» εννοούμε την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με άτομα των μορίων του νερού που βρίθκει στο κύτταρο. «Όπως αναφέρουν οι Dowsett David et al. (2006), το φορτισμένο σωματίδιο διέρχεται μέσω του ιστού μεταφέροντας έτσι ένα ποσό της ενέργειάς του στα ατομικά ηλεκτρόνια του βιολογικού υλικού». Πιο συγκεκριμένα, η έμμεση επίδραση της ιονίζουσας ακτινοβολίας προξενεί βιολογική βλάβη εξαιτίας της χημικής αντίδρασης σημαντικών οργανικών μορίων του κυττάρου με δραστικές ελεύθερες ρίζες οι οποίες δημιουργούνται κατά τη ραδιόλυση του νερού μέσω των ιονισμών. Οι ελεύθερες ρίζες λόγω της δραστικότητάς τους, προκαλούν θραύσεις στο μόριο του DNA και στους δεσμούς που αναπτύσσονται μεταξύ των γειτονικών βάσεων (σκαλιά).

³⁷ Χημικός δεσμός καλείται μια ισχυρή ελκτική δύναμη που συνδέει άτομα ή ιόντα επιτρέποντας το σχηματισμό μορίων χημικών ουσιών που εμπεριέχουν δύο ή περισσότερα άτομα. Οι χημικοί δεσμοί διακρίνονται σε δύο είδη: στους ιοντικούς και στους ομοιοπολικούς. Οι ιοντικοί δεσμοί προκύπτουν από την ελκτική δύναμη που ασκείται ανάμεσα σε αντίθετα φορτισμένα ιόντα. Στους ομοιοπολικούς δεσμούς δύο άτομα μοιράζονται ηλεκτρόνια σθένους, δηλαδή τα ηλεκτρόνια των εξωτερικών στοιβάδων τα οποία έλκονται ταυτόχρονα και από τους δύο θετικά φορτισμένους πυρήνες των δύο ατόμων επιφέροντας έτσι τη σύνδεσή τους. Πηγή από: Σπηλιόπουλος Ιωακείμ και άλλοι (2015), Χημεία, κεφ. 2, σελ. 44.

Το σπάσιμο της αλυσίδας του DNA προκαλείται και από την άμεση ακτινοβολία. Αν και τα απλά σπασίματα της αλυσίδας του DNA είναι δυνατόν να αποκατασταθούν από τους διορθωτικούς μηχανισμούς του κυττάρου, τα διπλά σπασίματα είναι πολύ δύσκολο να επιδιορθωθούν και οδηγούν σε μετάλλαξη ή κυτταρικό θάνατο. Τα άμεσα αποτελέσματα εμφανίζονται όταν ένας μεγάλος αριθμός των κυττάρων θανατωθεί. Εν συνεχεία, σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα εξαρτώμενο από το είδος των κυττάρων, θα διαφανούν οι επιπτώσεις του κυτταρικού θανάτου. Εφόσον το κύτταρο επιζήσει όντας μεταλλαγμένο εξετάζουμε την πιθανότητα εμφάνισης στοχαστικών (απώτερων, τυχαίων) αποτελεσμάτων, όπως η καρκινογένεση ή η μετάδοση της αλλοιωμένης κληρονομικής πληροφορίας στους απογόνους σε περίπτωση μετάλλαξης των γενετικών κυττάρων (ωάρια, σπερματοζωάρια).

Η ακτινοβόληση των κυττάρων μπορεί: να μην επιφέρει καμιά επίδραση, να καθυστερήσει την αναπαραγωγική διαδικασία του, να προκαλέσει κυτταρικό θάνατο ή αναπαραγωγική αποτυχία, δηλαδή το κύτταρο να πεθάνει τη στιγμή που επιχειρείται η πρώτη ή η μεταγενέστερη διαδικασία μίτωσης.

4.5 Τα καθορισμένα και τα στοχαστικά αποτελέσματα

Από τη σκοπιά της ακτινοπροστασίας η πιο βασική διαίρεση των βιολογικών επιδράσεων των ιοντιζουσών ακτινοβολιών είναι σε καθορισμένα και στοχαστικά αποτελέσματα.

Τα καθορισμένα ή αιτιοκρατικά αποτελέσματα είναι αυτά τα οποία πηγάζουν από την θανάτωση των κυττάρων και παρουσιάζονται σε σύντομο χρονικό διάστημα από την ακτινοβόληση. Τα καθορισμένα αποτελέσματα ενέχουν σοβαρότητα ανάλογη με το επίπεδο της δόσης της ακτινοβολίας που έλαβε ο εκτεθειμένος και υπάρχει κατώφλι δόσης κάτω από το οποίο η πιθανότητα εμφάνισης της βλάβης είναι μηδενική. Άμα όμως η δόση ξεπεράσει το κατώφλι, τότε η βλάβη θα εμφανιστεί και μάλιστα με την αύξηση της δόσης θα αυξηθεί και η σοβαρότητα αυτής.

Σύμφωνα με τον ορισμό της NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements- Εθνικό Συμβούλιο για την Ακτινοπροστασία και τις Μετρήσεις) που είναι μια αμερικανική οργάνωση, ιδρυθείσα το 1929: «Ένα φαινόμενο στο οποίο η σοβαρότητα των παθήσεων που εμφανίζουν οι μεμονωμένοι εκτεθειμένοι, αυξάνει με την αυξανόμενη δόση, συνήθως πάνω από ένα κατώφλι (ατροφία οργάνων, ινώσεις, παθήσεις δέρματος)».

Οι περιπτώσεις όπου οι δόσεις υπερβαίνουν κατά πολύ τις δόσεις κατωφλίου είναι στα πυρηνικά ατυχήματα, στην απρόσεχτη διαχείριση πολύ ισχυρών ραδιενεργών πηγών και

στην ακτινοθεραπεία. Στις κοινές διαγνωστικές εξετάσεις (ακτινογραφίες, μαστογραφίες) οι δόσεις είναι 1000 φορές μικρότερες από τις δόσεις κατώφλιου.

Τα στοχαστικά ή απώτερα ή τυχαία αποτελέσματα έχουν πιθανότητα εμφάνισης όταν το κύτταρο επιζήσει αλλά είναι μεταλλαγμένο. Για τα στοχαστικά αποτελέσματα δεν υπάρχει κατώφλι δόσης και η πιθανότητα εμφάνισής τους ξεκινά από πολύ μικρές δόσεις. Τα στοχαστικά αποτελέσματα προερχόμενα από μεταλλάξεις κυττάρων, παρουσιάζονται ύστερα από μεγάλο χρονικό διάστημα (20-30 χρόνια) είτε στο άτομο που εκτέθηκε είτε στους απογόνους του ή μπορεί να μην εμφανιστούν καθόλου.

Σύμφωνα με τον ορισμό της NCRP: «Ένα φαινόμενο στο οποίο η πιθανότητα εμφάνισής του αυξάνει με την αυξανόμενη δόση ακτινοβολίας αλλά στο οποίο η σοβαρότητα των παθήσεων που εμφανίζουν οι μεμονωμένοι εκτεθειμένοι δεν εξαρτάται από τη δόση (εμφάνιση καρκίνου, γενετικές αλλοιώσεις). Δεν υπάρχει κάποιο ελάχιστο κατώφλι στη δόση για τα φαινόμενα τα οποία είναι πραγματικά στοχαστικά».

Στα στοχαστικά αποτελέσματα κατατάσσονται ο καρκίνος, η λευχαιμία και η μετάδοση γενετικών ανωμαλιών στους απογόνους. Αν και η απορροφούμενη δόση αυξάνει την υπάρχουσα πιθανότητα εμφάνισης της βλάβης, τα προαναφερθέντα αποτελέσματα μπορεί να προκληθούν και από άλλους παράγοντες όπως το περιβάλλον, η κακή διατροφή, ο τρόπος ζωής και η κληρονομικότητα.

4.6 Οι ανιχνευτές της ιονίζουσας ακτινοβολίας με αέριο

Η ανίχνευση και η μέτρηση της ιονίζουσας ακτινοβολίας πραγματοποιείται διαμέσου φαινομένων αλληλεπίδρασης τα οποία εξελίσσονται εντός ενός μέσου ανίχνευσης. Οι ανιχνευτές ακτινοβολίας με αέριο (gaseous ionization detectors) χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της έντασης μιας δέσμης ακτινοβολίας ή για την καταμέτρηση μεμονωμένων φορτισμένων σωματιδίων. Η βασική σχεδιαστική αρχή των ανιχνευτών αυτών είναι η ίδια. Πρόκειται για θαλάμους με αέριο όπου δημιουργούνται ιόντα κατά την αλληλεπίδραση με την ακτινοβολία. Η συσκευή αυτή αποτελείται από ένα θάλαμο που περιέχει αέριο σε μικρή πίεση και ένα μεμονωμένο από τα τοιχώματα του θαλάμου κεντρικό ηλεκτρόδιο. Στον όγκο του αερίου εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο με την εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης (διαφοράς δυναμικού) μεταξύ των τοιχωμάτων του θαλάμου (κάθοδος) και του κεντρικού ηλεκτροδίου (άνοδος) και κατά αυτόν τον τρόπο συλλέγονται τα ιόντα.

Στη συνέχεια, τα ιόντα μετρώνται με τη χρήση ειδικών ηλεκτρονικών διατάξεων και δημιουργείται ένα ηλεκτρικό σήμα. Το ηλεκτρικό σήμα μετατρέπεται σε δόση (mGy) ή

ρυθμό δόσης (mGy/hr) ή σε συμβάντα (counts ή counts/sec) ανάλογα με τον τύπο της συσκευής. Οι ανιχνευτές της ιοντίζουσας ακτινοβολίας με αέριο ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το μέτρο της εφαρμοζόμενης τάσης: στους ανιχνευτές-μετρητές Geiger-Müller, στους αναλογικούς απαριθμητές και στους ανιχνευτές ιονισμού.

4.6.1 Ο ανιχνευτής Geiger-Müller

Ο ανιχνευτής Geiger-Müller είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός για τη μέτρηση μεμονωμένων σωματιδίων ακτινοβολίας (σωματίδια άλφα και βήτα και ακτίνες γ). Ένας μετρητής Geiger-Müller συνίσταται από το σωλήνα Geiger-Müller που είναι το αισθητήριο στοιχείο που ανιχνεύει την ακτινοβολία και από τα ηλεκτρονικά επεξεργασίας που εμφανίζουν το αποτέλεσμα. Ο μετρητής Geiger-Müller ανιχνεύει ηλεκτρόνια και φωτόνια ρυθμίζοντας τη θέση του παραθύρου εισόδου του και όταν βρεθεί σε πεδίο υψηλών επιπέδων ακτινοβολίας φτάνει σε κορεσμό.

Ο μεταλλικός σωλήνας Geiger-Müller είναι η κάθοδος και είναι σφραγισμένος με ένα αδρανές αέριο το νέον, το ήλιο ή το αργόν, σε χαμηλή πίεση στο οποίο εφαρμόζεται υψηλή τάση. Η άνοδος είναι η ράβδος που βρίσκεται κατά μήκος του άξονα του σωλήνα. Μια μεγάλη διαφορά δυναμικού (της τάξεως των 400-500V) εφαρμόζεται μεταξύ της καθόδου και της ανόδου. Όταν ένα σωματίδιο ακτινοβολίας εισέλθει διαμέσου του παραθύρου εισόδου στο σωλήνα, προκαλεί ιονισμό εντός του σωλήνα. Τα θετικά ιόντα (κατιόντα) έλκονται από την κάθοδο, ενώ τα αρνητικά ιόντα (ανιόντα) έλκονται από την άνοδο.

Η μεγάλη διαφορά δυναμικού μεταξύ της ανόδου και της καθόδου επιταχύνει τα ιόντα και συγκρούονται με άλλα άτομα. Ο ιονισμός ενισχύεται σημαντικά μέσα στο σωλήνα λόγω του φαινομένου εκκένωσης του Townsend που συντελεί στην παραγωγή ενός παλμού ανίχνευσης που μετράται εύκολα και τροφοδοτείται στα ηλεκτρονικά επεξεργασίας και εμφάνισης.³⁸

Τέλος, ο ανιχνευτής Geiger-Müller έχει μεγάλο χρόνο απόκρισης σε σύγκριση με τους ανιχνευτές ιονισμού και διαθέτει ηχητική ειδοποίηση για την ύπαρξη ακτινοβολίας σε ένα χώρο.

³⁸Το φαινόμενο εκκένωσης του Townsend είναι ένα φυσικό φαινόμενο που περιλαμβάνει τη σκέδαση χαμηλής ενέργειας ηλεκτρονίων από άτομα ενός ευγενούς αερίου. Όταν ένα ηλεκτρόνιο κινείται μέσω ενός ευγενούς αερίου, οι αλληλεπιδράσεις του με τα άτομα του αερίου προκαλούν σκεδάσμό. Πηγή από: Πέππα Σοφία (2013), Μελέτη και σχεδίαση αναβάθμισης της εργαστηριακής εκπαίδευσης στο αντικείμενο των υψηλών τάσεων, κεφ.6, σελ. 154.

4.6.2 Ο αναλογικός απαριθμητής

Ο αναλογικός απαριθμητής ανιχνεύει ως επί τω πλείστον σωμάτια άλφα και ηλεκτρόνια. Χρησιμοποιείται σε ερευνητικά εργαστήρια. Οι αναλογικοί απαριθμητές όπως και οι μετρητές Geiger-Müller είναι κατασκευασμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να μετρούν το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από τα ιόντα που σχηματίζονται από την πρόσκρουση των ραδιοϊσοτόπων με ένα αέριο.

Αν η εφαρμοζόμενη τάση μεταξύ καθόδου και ανόδου αυξηθεί ακόμα περισσότερο τότε τα πρωτεύοντα ιόντα επιταχύνονται αρκετά μέσα στο θάλαμο και έτσι αποκτούν ενέργεια ικανή προκειμένου να προκαλέσουν περαιτέρω ιονισμό. Επομένως, προκαλείται το φαινόμενο εκκένωσης του Townsend. Το φαινόμενο σταματά όταν όλα τα ελεύθερα ηλεκτρόνια συγκεντρωθούν στην άνοδο. Με κατάλληλη εκλογή των χαρακτηριστικών του θαλάμου, ο αριθμός των δευτερευόντων ιονισμών δύναται να διατηρηθεί ανάλογος του πρωτεύοντος ιονισμού.

4.6.3 Ο ανιχνευτής ιονισμού

Ο ανιχνευτής ιονισμού ανιχνεύει και μετρά ακτίνες X και γ και σωματίδια βήτα. Επιπλέον, προτιμάται ως μέσο ανίχνευσης υψηλών επιπέδων ακτινοβολίας γ και χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία πυρηνικής ενέργειας, σε εργαστήρια έρευνας, σε εργαστήρια πυρηνικής ιατρικής, ακτινολογίας και ακτινοθεραπείας. Καλείται και «θάλαμος ιονισμού» με σκοπό να περιγράψει τους ανιχνευτές αυτούς που συλλέγουν όλα τα φορτία που δημιουργούνται από τον άμεσο ιονισμό εντός του αερίου μέσω της εφαρμογής ενός ηλεκτρικού πεδίου. Ένας θάλαμος ιονισμού μετρά το φορτίο από τον αριθμό των ζευγών ιόντων που δημιουργούνται μέσα σε ένα αέριο και προκαλείται από την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Ο ανιχνευτής ιονισμού αποτελείται από έναν θάλαμο γεμισμένο με αέρα με δύο ηλεκτρόδια, την κάθοδο και την άνοδο. Μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων εφαρμόζεται ηλεκτρική τάση ώστε να δημιουργηθεί ένα ηλεκτρικό πεδίο στο αέριο πλήρωσης. Εφόσον το αέριο μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων ιονιστεί από την προσπίπτουσα ακτινοβολία, δημιουργούνται ζεύγη ιόντων. Τα θετικά και τα αρνητικά ιόντα που προκύπτουν κινούνται προς τα ηλεκτρόδια της αντίθετης πολικότητας υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου. Έτσι παράγεται ένα ρεύμα ιονισμού το οποίο μετράται από ένα κύκλωμα ηλεκτρομέτρου.

Το ηλεκτρικό πεδίο είναι επαρκώς ισχυρό για να επιτρέψει στη συσκευή να λειτουργεί συνεχώς αποτρέποντας τον ανασυνδυασμό ζευγών ιόντων που θα μείωνε το ρεύμα των ιόντων. Ως εκ τούτου το σήμα εξόδου είναι συνεχές ρεύμα και όχι έξοδος παλμών όπως

στο ανιχνευτή Geiger-Müller και στον αναλογικό απαριθμητή. Το συνεχές μετρούμενο ρεύμα είναι ανάλογο του ρυθμού δόσης (η ενέργεια που καταβάλλεται ανά μονάδα χρόνου) στο θάλαμο ιονισμού διότι ο αριθμός των ζευγών ιόντων που προκύπτουν είναι ανάλογος με την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Ο χρόνος απόκρισης του θαλάμου ιονισμού είναι μικρότερος σε σχέση με το μετρητή Geiger-Müller.

4.7 Ανιχνευτές σπινθηρισμού

Ορισμένα υλικά που ονομάζονται σπινθηριστές ή φθορίζουσες ενώσεις μπορούν να απορροφούν ενέργεια από ιονίζουσα ακτινοβολία και να εκπέμπουν σπινθηρισμούς υπό τη μορφή ασθενών λάμψεων ορατού φωτός. Το ορατό φως συλλέγεται από ειδικές διατάξεις που καλούνται φωτοπολλαπλασιαστές και μετατρέπουν το φως σε ηλεκτρικό σήμα. Το υλικό των ανιχνευτών σπινθηρισμού είναι συνήθως κρύσταλλος ιωδιούχου νατρίου (NaI).

Το μέγεθος των παλμών που εξέρχεται από το φωτοπολλαπλασιαστή είναι ανάλογο της ενέργειας των φωτονίων που απορροφούνται και ο αριθμός των παλμών συνδέεται με τη συχνότητα με την οποία αλληλεπιδρά η ακτινοβολία με το φθορίζον υλικό. Οι ανιχνευτές σπινθηρισμού εκτός από το επίπεδο της ακτινοβολίας μπορούν να μας πληροφορήσουν και για την ενέργεια αυτής. Οι ανιχνευτές σπινθηριστών από κρύσταλλο ιωδιούχου νατρίου χρησιμοποιούνται στα εργαστήρια πυρηνικής ιατρικής και σε συσκευές μέτρησης δειγμάτων αίματος που έχουν επισημανθεί με ραδιοϊσότοπο.

4.8 Προσωπικά δοσίμετρα (δοσίμετρα θερμοφωταύγειας)

Δοσίμετρο καλείται η διάταξη, το όργανο ή το σύστημα που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση ή την εκτίμηση οποιασδήποτε ποσότητας μπορεί να συσχετιστεί με τον καθορισμό της δόσης ακτινοβολίας. Τα δοσίμετρα θερμοφωταύγειας (Thermoluminescence Dosimeters, TLDs) συνίσταντο από ανόργανα υλικά, μονωτές ή ημιαγωγούς, όπως φθοριούχο λίθιο (LiF) με προσμίξεις μαγγανίου (Mg) και τιτανίου (Ti), βορικό λίθιο, θειικό και φθοριούχο ασβέστιο που εμπεριέχουν διάφορες προσμίξεις.

Τα δοσίμετρα θερμοφωταύγειας μπορούν να απορροφήσουν και να αποθηκεύσουν ενέργεια από ιονίζουσα ακτινοβολία και εν συνεχεία κατά τη θέρμανσή τους την αποδίδουν μετατρέποντάς την σε φωτεινή ακτινοβολία. Η χαρακτηριστική ιδιότητα των

προαναφερθέντων υλικών λέγεται θερμοφωταύγεια.³⁹ Εξαιτίας της ιονίζουσας ακτινοβολίας που απορροφούν τα ηλεκτρόνια των υλικών των δοσιμέτρων θερμοφωταύγειας, αποσπώνται από τα μητρικά τους άτομα και βρίσκονται σε κατάσταση διέγερσης. Το ορατό φως εκπέμπεται όταν τα ηλεκτρόνια αποδιεγείρονται και επανέρχονται στη θεμελιώδη τους κατάσταση.

Τα δοσίμετρα θερμοφωταύγειας αποδίδουν φωτεινή ενέργεια ανάλογη της απορροφούμενης δόσης και αποτελούν βασικό εργαλείο της ατομικής δοσιμέτρησης των επαγγελματικά εκτεθειμένων στην ιονίζουσα ακτινοβολία ατόμων και της δοσιμέτρησης των ασθενών. Αξιοσημείωτο είναι ότι τα TLDs διακρίνονται για την υψηλή ευαισθησία και ακρίβειά τους, τα χαμηλά όρια ανίχνευσης και τη γραμμικότητα σε μεγάλη περιοχή δόσεων. Επιπλέον, διαθέτουν μακροχρόνια απόκριση και δύνανται να επαναχρησιμοποιηθούν.

Κάποια υλικά που παρουσιάζουν τη χαρακτηριστική ιδιότητα της θερμοφωταύγειας, λόγω χάρη το φθοριούχο λίθιο (LiF) με προσμίξεις μαγγανίου (Mg) και τιτανίου (Ti) είναι ισοδύναμα του ιστού, ειδικότερα απορροφούν την ιονίζουσα ακτινοβολία όπως ένας ανθρώπινος ιστός. «Όπως αναφέρει η Aschan Carita (1999), τα δοσίμετρα θερμοφωταύγειας είναι ικανά για τον προσδιορισμό της απορροφούμενης δόσης στον ιστό για διάφορες συνθήκες κλινικής έκθεσης». Τέλος, τα TLDs εξαιτίας της δυνατότητάς τους να ανιχνεύουν β σωματίδια και να δοσιμετρούν τα άκρα χρησιμοποιούνται ευρέως στα εργαστήρια της Πυρηνικής Ιατρικής και στην επεμβατική ακτινολογία.

4.9 Ανακεφαλαίωση

Όταν η ιονίζουσα ακτινοβολία προκαλεί ιονισμό σε έναν ιστό επιφέρει τη ρήξη ενός χημικού δεσμού με απόρροια την παραγωγή δραστικών ελεύθερων ριζών. Έτσι

³⁹ Η φωταύγεια καλείται η εκπομπή ορατής ακτινοβολίας από ένα σώμα που προξενείται από οποιαδήποτε αιτία εκτός της θέρμανσής του. Τα φωταυγάζοντα ή φωτογενή υλικά χαρακτηρίζονται από την ικανότητα να απορροφούν ένα συγκεκριμένο τύπο ενέργειας, να αποθηκεύουν μέρος αυτής για ορισμένο χρονικό διάστημα και εν συνεχεία να το επανεκπέμπουν σε μορφή οπτικής ακτινοβολίας. Η θερμοφωταύγεια είναι μια μέθοδος χρονολόγησης που βασίζεται στη μέτρηση της ποσότητας του φωτός που εκπέμπεται από διάφορα ορυκτά όταν θερμαίνονται. Ένας μεγάλος αριθμός ορυκτών φωτοβολεί όταν θερμαίνεται. Η ένταση του φωτός είναι ένα μέτρο της δόσης της ακτινοβολίας στην οποία έχουν εκτεθεί τα ορυκτά από τον καιρό της αποσύνθεσής τους. Πηγή από: Κουτρομπής Π. Γεώργιος (2000), Ακτινοπροστασία, κεφ.5, 68-69.

καταστρέφεται ένα μόριο ωφέλιμο για τη ζωή ή τον πολλαπλασιασμό του κυττάρου. Οι δραστικές ελεύθερες ρίζες που θα προκύψουν θα προξενήσουν επιπλέον βλάβη διότι θα επιτεθούν σε ωφέλιμα μόρια και θα τα καταστρέψουν δημιουργώντας βλαβερές ή άχρηστες για το κύτταρο χημικές ενώσεις. Βαρυσήμαντες για τη ζωή και τον πολλαπλασιασμό του κυττάρου είναι οι βλάβες που προκαλούνται στο γενετικό του υλικό προκαλώντας μεταβολή στη δομή ή τη λειτουργικότητά του με αποτέλεσμα τον κυτταρικό θάνατο, τις γονιδιακές μεταλλάξεις και τις χρωμοσωματικές ανωμαλίες.

Οι ιοντίζουσες ακτινοβολίες προκαλούν ποικιλία βιολογικών αποτελεσμάτων στους έμβιους οργανισμούς. Η ανάπτυξη τεχνικών και μεθόδων εξετάσεων αλλά ταυτόχρονα και η γνώση για τους κινδύνους των ακτινοβολιών εμπέδωσαν μια νέα θεώρηση που οφείλεται στα μέτρα ακτινοπροστασίας που σταδιακά εφαρμόστηκαν.

Αφότου ανακαλύφθηκε η ραδιενέργεια κρίθηκε αναγκαίο να κατασκευαστούν όργανα μέτρησης και να αναπτυχθούν μέθοδοι ανίχνευσης της ιονίζουσας ακτινοβολίας έτσι ώστε με τους κατάλληλους υπολογισμούς να καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός της έντασης και της ενέργειάς της. Οι ανιχνευτές της ιονίζουσας ακτινοβολίας τους οποίους αναλύσαμε παραπάνω, συνιστούν απαραίτητα εργαλεία στα πυρηνικά και ερευνητικά εργαστήρια, στην Ακτινοδιαγνωστική, στην Ακτινοθεραπεία, στην επεμβατική ακτινολογία, σε συσκευές μέτρησης δειγμάτων αίματος που έχουν επισημανθεί με ραδιοϊσότοπο και στις μετρήσεις ακτινοπροστασίας που εκτελεί ο Ακτινοφυσικός σε όλους τους χώρους όπου πραγματοποιούνται εξετάσεις με ιονίζουσα ακτινοβολία.⁴⁰ Οι αρχές ανίχνευσης στηρίζονται στα αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με την ύλη. Η ανίχνευση εξαρτάται από το είδος της ιοντίζουσας ακτινοβολίας και τη διεισδυτικότητά της.

⁴⁰ Η Ακτινοφυσική είναι ο κλάδος της φυσικής επιστήμης που εφαρμόζει της αρχές της Φυσικής στην Ιατρική με στόχο την πρόληψη, τη διάγνωση και τη θεραπεία ασθενών. Ο Ακτινοφυσικός προσφέρει τις υπηρεσίες του στην Πυρηνική Ιατρική, στην Ακτινοδιαγνωστική και στην Ακτινοθεραπεία. Ο Ακτινοφυσικός είναι υπεύθυνος για: α) την αποτελεσματική χρήση των ραδιοϊσοτόπων για διαγνωστικούς και θεραπευτικούς σκοπούς και των ακτινοδιαγνωστικών και ακτινοθεραπευτικών μηχανημάτων, β) την ανάπτυξη και την εφαρμογή νέων και σύνθετων μεθόδων και τεχνικών διάγνωσης και θεραπείας, γ) τη βελτιστοποίηση της ακτινοπροστασίας των ασθενών και του προσωπικού και δ) την παροχή οδηγιών ακτινοπροστασίας για την ασφαλή χρήση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας στα ιατρικά εργαστήρια. Πηγή από: <http://www.efie.gr/index.php/gr/medicalphysicist/role-in-medical-applications>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ

5.1 Εισαγωγή

Η χρήση της ιονίζουσας ακτινοβολίας στην ιατρική, στην παραγωγή ενέργειας, στη βιομηχανία και στην έρευνα προσφέρει τεράστια οφέλη στην ανθρωπότητα όταν χρησιμοποιείται με ασφάλεια. Η Ακτινοπροστασία είναι η επιστήμη που έχει ως αντικείμενο την προστασία του ανθρώπου και του περιβάλλοντος έναντι των βλαβερών επιδράσεων της ιονίζουσας ακτινοβολίας με παράλληλη διατήρηση του οφέλους που προκύπτει από την ορθολογική χρήση της.

Τα οφέλη της ακτινοβολίας διαπιστώθηκαν για πρώτη φορά κατά τη χρήση των ακτίνων X για ιατρική διάγνωση σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά την ανακάλυψή τους. Η βιασύνη για την εκμετάλλευση των ιατρικών οφελών οδήγησε αρκετά σύντομα στην αναγνώριση της άλλης πλευράς του νομίσματος, της ζημίας που προκλήθηκε από την ιονίζουσα ακτινοβολία. Ωστόσο, παρατηρήθηκαν μόνο οι πιο προφανείς μορφές βλαβών που προκύπτουν από τις υψηλές δόσεις ακτινοβολίας όπως τα εγκαύματα και οι προσπάθειες ακτινοπροστασίας επικεντρώθηκαν κυρίως στους επαγγελματίες της υγείας παρά στους ασθενείς.

Το 1928 ιδρύθηκε η ICRP (International Commission on Radiological Protection - Διεθνής Επιτροπή Ραδιολογικής Προστασίας ή Ακτινοπροστασίας). Η ICRP είναι ένας μη κυβερνητικός επιστημονικός οργανισμός που αποτελείται από ειδικούς στο χώρο επιστήμονες από διάφορες χώρες του κόσμου. Ο σκοπός της ICRP είναι η αναζήτηση των μέτρων και των κανόνων ασφαλείας για την ελαχιστοποίηση των βλαπτικών επιπτώσεων των ιοντιζουσών ακτινοβολιών στον άνθρωπο.

Στην Ευρώπη αρμόδια για τη νομοθεσία περί ακτινοπροστασίας είναι η EURATOM (European Atomic Energy Community στα ελληνικά: Ευρωπαϊκή Κοινότητα Ατομικής Ενέργειας, ΕΥΡΑΤΟΜ) η οποία καθορίζει το Ευρωπαϊκό Σύστημα Ακτινοπροστασίας. Στην Ελλάδα Εθνική αρμόδια αρχή για θέματα ακτινοπροστασίας είναι η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) η οποία εναρμονίζει την ελληνική νομοθεσία με τις οδηγίες της Euratom.

Στο υπό συζήτηση κεφάλαιο θα αναπτύξουμε το διεθνές, το ευρωπαϊκό και το εθνικό σύστημα ακτινοπροστασίας. Έπειτα, θα αναλυθούν οι αρχές και οι κανονισμοί ακτινοπροστασίας. Ακολούθως, θα αναλύσουμε διεξοδικά την ακτινοπροστασία κατά τις εργασιακές πρακτικές.

5.2 Το διεθνές σύστημα ακτινοπροστασίας

Η ICRP με συστάσεις που εκδίδει κατά καιρούς, καθορίζει την ακολουθητέα διεθνή πολιτική σε θέματα ακτινοπροστασίας. Αναπτύσσει το σύστημα της ακτινοπροστασίας που εφαρμόζεται παγκοσμίως ορίζοντας τα πρότυπα, τη νομοθεσία, τις κατευθυντήριες γραμμές, τα προγράμματα και τις πρακτικές. Το διεθνές σύστημα ακτινοπροστασίας βασίζεται στα επιστημονικά δεδομένα που αφορούν τη βλαπτικότητα των ακτινοβολιών και προκύπτουν από μακροχρόνιες συστηματικές επιδημιολογικές και ραδιοβιολογικές μελέτες πληθυσμών που εκτέθηκαν σε υψηλές δόσεις ιονίζουσών ακτινοβολιών.

Η Επιστημονική Επιτροπή του Οργανισμού των Ηνωμένων Εθνών για τις Επιδράσεις της Ατομικής Ακτινοβολίας (UNSCEAR: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) ιδρύθηκε το 1955 με απόφαση της γενικής συνέλευσης του Ο.Η.Ε., παρακολουθεί τα προαναφερθέντα επιστημονικά δεδομένα. Εκτενέστερα, η UNSCEAR εκτιμά τα επίπεδα της δόσης από ακτινοβολία στην οποία εκτίθεται ο πληθυσμός εξαιτίας φυσικών ή τεχνητών πηγών ακτινοβολίας.⁴¹ Επιπρόσθετα, η UNSCEAR αναλύει τις συνέπειες για την ανθρώπινη υγεία από τις απορροφούμενες δόσεις και εκδίδει σχετικές αναφορές που αντανακλούν τα τελευταία επιστημονικά δεδομένα. Η UNSCEAR δεν εκδίδει πρότυπα ή συστάσεις σχετικές με την ασφάλεια.

⁴¹Οι ακτινοβολίες με κριτήριο την προέλευση των πηγών τους ταξινομούνται σε φυσικές και σε τεχνητές ακτινοβολίες. Οι φυσικές πηγές ακτινοβολίας είναι τα φυσικά ραδιοϊσότοπα που βρίσκονται στο έδαφος, στο υπέδαφος, στο νερό, στον αέρα και στην τροφή και έχουν δημιουργηθεί από το σχηματισμό της γης. Ακόμη, το ραδιενεργό αέριο Ραδόνιο που υπάρχει στα πετρώματα και η κοσμική ακτινοβολία που εκπέμπει κάθε ουράνιο σώμα, όπως ο ήλιος είναι φυσική πηγή ακτινοβολίας. Τεχνητές πηγές ακτινοβολίας είναι τα διαγνωστικά και θεραπευτικά μηχανήματα που χρησιμοποιούνται στην Ιατρική καθώς και τα τεχνητά ραδιοϊσότοπα που αποτελούν βασικό εργαλείο στην Πυρηνική Ιατρική, σε έρευνες και στη βιομηχανία. Πηγή από: Davidovits P. (2007), *Physics in Biology and Medicine* third edition, Complementary Science series, p. 268-269.

Οι συστάσεις της ICRP βασίζονται στις αναφορές της UNSCEAR για τα νέα επιστημονικά δεδομένα. Η ICRP στην έκδοσή της Publication 60 (1991) εμπλούτισε με νέες γνώσεις το περιεχόμενο των προηγούμενων εκδόσεων της σχετικά με θέματα ακτινοπροστασίας και ραδιοβιολογίας. Επιπλέον, η ICRP αναθεώρησε το ισχύον σύστημα ακτινοπροστασίας και πρότεινε νέα όρια δόσεων για τους εκτεθειμένους εργαζομένους και τον πληθυσμό από τις εφαρμογές των ιοντιζουσών ακτινοβολιών.

Στο διεθνές σύστημα ακτινοπροστασίας ανήκει και ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (IAEA: International Atomic Energy Agency) που ιδρύθηκε το 1957 ως όργανο του Ο.Η.Ε.. Ο IAEA είναι παγκόσμιο διακυβερνητικό όργανο αρμόδιο για την επιστημονική και τεχνική συνεργασία στην ασφαλή και ειρηνική χρήση της πυρηνικής ενέργειας και τεχνολογίας. Επίσης, ο IAEA είναι εξουσιοδοτημένο σώμα για τη δημιουργία προτύπων ασφαλείας για την προστασία της υγείας και τη μείωση του κινδύνου.

Ειδικότερα, ο IAEA υιοθέτησε από την ICRP το προτεινόμενο σύστημα ακτινοπροστασίας και εξέδωσε τα Διεθνή Βασικά Πρότυπα Ασφάλειας για την Προστασία έναντι των Ιοντιζουσών Ακτινοβολιών (International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation-BSS). Για την επίτευξη αυτής της έκδοσης συνεργάστηκαν οι σχετιζόμενοι με τη χρήση ακτινοβολιών διεθνείς και παγκόσμιοι οργανισμοί εργασίας, υγείας και ενέργειας σε μια προσπάθεια διεθνοποίησης του συστήματος ακτινοπροστασίας.

«Όπως αναφέρει ο IAEA (2011) η σειρά προτύπων ασφαλείας περιλαμβάνει ενιαίες αρχές θεμελιώδους ασφάλειας, οι οποίες αντιπροσωπεύουν μια διεθνή συναίνεση για το τι πρέπει να συνιστά ένα υψηλό επίπεδο προστασίας και ασφάλειας. Τα πρότυπα ισχύουν μόνο εάν εφαρμόζονται σωστά στην πράξη». Τέλος, ο IAEA εκδίδει κατευθυντήριες οδηγίες σχετικά με την ασφάλεια και την ακτινοπροστασία. Σύμφωνα με το IAEA (2007) ως ακτινοπροστασία ορίζεται: « Η προστασία των ανθρώπων από τις βλαβερές συνέπειες της έκθεσης σε ιονίζουσες ακτινοβολίες και τα μέσα για την επίτευξη αυτού του στόχου».

Η ICRP το 2007 δημοσίευσε νέες συστάσεις με βάση τα επικαιροποιημένα επιστημονικά δεδομένα της UNSCEAR (UNSCEAR 2000) και τη διεθνώς αποκομισθείσα εμπειρία από την εφαρμογή των συστάσεών της του 1991. Ως εκ τούτου ξεκίνησε η αναθεώρηση τόσο του διεθνούς όσο και του ευρωπαϊκού συστήματος ακτινοπροστασίας.

5.3 Το ευρωπαϊκό σύστημα ακτινοπροστασίας

Η Ευρωπαϊκή Κοινότητα Ατομικής Ενέργειας (ΕΥΡΑΤΟΜ-Euratom) ιδρύθηκε με τη συνθήκη της Ρώμης στις 25 Μαρτίου του 1957 (ΣυνθΕΟΚ) και καθορίζει το Ευρωπαϊκό Σύστημα Ακτινοπροστασίας. Η ίδρυσή της αποσκοπούσε στο να θέσει υπό κοινό έλεγχο και διαχείριση την παραγωγή και τη διάθεση της ατομικής ενέργειας. «Όπως αναφέρεται στην Official Journal of the European Union (2010), αποτελεί καθήκον της Κοινότητας να συμβάλλει στην αύξηση του βιοτικού επιπέδου των κρατών-μελών και στην ανάπτυξη των σχέσεων με άλλες χώρες με τη δημιουργία αναγκαίων συνθηκών για την ταχεία εγκαθίδρυση και ανάπτυξη των πυρηνικών βιομηχανιών».

Η Euratom είναι αρμόδια για την έκδοση Οδηγιών (Directives) που αφορούν τα βασικά πρότυπα ασφαλείας για την προστασία των εργαζομένων και του κοινού έναντι των κινδύνων που επιφέρουν οι ιονίζουσες ακτινοβολίες με τη μορφή οδηγιών. Τα πρότυπα της Euratom είναι συμβατά με τα διεθνή και η μεταφορά τους στη νομοθεσία των κρατών-μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.) είναι δεσμευτική. Η Ε.Ε. με βάση τα διεθνή BSS εξέδωσε το 1996 και το 1997 δύο Οδηγίες (96/29/Euratom και 97/43/Euratom) που αφορούσαν την ακτινοπροστασία του κοινού, των εργαζομένων και των ασθενών που σύμφωνα με τη συνθήκη της Euratom όφειλαν να ενσωματωθούν στη νομοθεσία των κρατών-μελών της Ε.Ε..

Αναλυτικότερα, οι αρμοδιότητες της Euratom συνίστανται:

- στην προώθηση της έρευνας και στην εξασφάλιση της διάδοσης τεχνικών πληροφοριών
- στη θέσπιση ομοιόμορφων προτύπων ασφαλείας για την προστασία της υγείας των εργαζομένων και του ευρέος κοινού και στην εξασφάλιση της εφαρμογής τους
- στην εξασφάλιση, με κατάλληλη εποπτεία, ότι τα πυρηνικά υλικά δεν εκτρέπονται για σκοπούς άλλους από εκείνους για τους οποίους προορίζονται
- στην εξασφάλιση ευρείας εμπορικής διάθεσης και πρόσβασης στις καλύτερες τεχνικές εγκαταστάσεις με τη δημιουργία μιας κοινής αγοράς εξειδικευμένων υλικών και εξοπλισμού, με ελεύθερη κυκλοφορία κεφαλαίων για τις επενδύσεις στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας
- στην άσκηση του δικαιώματος κυριότητας που της έχει ανατεθεί σε σχέση με ειδικά σχάσιμα υλικά
- στη διευκόλυνση των επενδύσεων και στην εξασφάλιση, ενθαρρύνοντας τις επιχειρήσεις, της δημιουργίας των βασικών εγκαταστάσεων που είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη των πυρηνικών βιομηχανιών

- στη δημιουργία με άλλες χώρες και διεθνείς οργανισμούς των σχέσεων που θα προωθήσουν την πρόοδο στις ειρηνικές χρήσεις της πυρηνικής ενέργειας

Το 2001 εξεδόθησαν οι ισχύοντες Εθνικοί Κανονισμοί Ακτινοπροστασίας (ΦΕΚ 216Β /2001) που εναρμονίζουν την ελληνική νομοθεσία με τις οδηγίες της Euratom. Οι Κανονισμοί Ακτινοπροστασίας αποτελούν νόμο του κράτους και στοχεύουν στην προστασία των ανθρώπων και του περιβάλλοντος από τις επιβλαβείς επιδράσεις των ιοντιζουσών ακτινοβολιών που προέρχονται από την ειρηνική τους χρήση.

5.4 Το εθνικό σύστημα ακτινοπροστασίας

Το εθνικό σύστημα ακτινοπροστασίας βασίζεται στην έκδοση Publication 60 της ICRP (1991). Εθνική αρμόδια αρχή για ζητήματα ακτινοπροστασίας είναι η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ). Ο ρόλος της ΕΕΑΕ είναι να συντάσσει και να μεριμνά για την εφαρμογή των Κανονισμών και να εισηγείται πρόσθετα μέτρα όποτε κρίνει σκόπιμο με στόχο να εξασφαλίζεται ο περιορισμός των ατομικών και συλλογικών δόσεων που προκύπτουν από τις πρακτικές εφαρμόζοντας τρεις κύριες αρχές: την αρχή της αιτιολόγησης, την αρχή της βελτιστοποίησης και την αρχή του ορίου δόσεων.⁴²

Αναλυτικότερα, η αρχή της αιτιολόγησης αναφέρει ότι καμία πρακτική που ενέχει έκθεση ή δυνητική έκθεση ενός ατόμου σε ιονίζουσα ακτινοβολία δεν πρέπει να πραγματοποιείται εκτός αν από αυτήν προκύπτει καθαρό όφελος έτσι ώστε να αντισταθμίζεται η πιθανή βλάβη την οποία αυτή μπορεί να προκαλέσει. Επομένως, όλες οι νέες πρακτικές που συνεπάγονται έκθεση πρέπει να έχουν την έγκριση της ΕΕΑΕ προτού εφαρμοστούν.

Επιπρόσθετα, οι εφαρμοζόμενες ή υπάρχουσες πρακτικές που ενέχουν έκθεση πρέπει να αναθεωρούνται από την ΕΕΑΕ όταν ανακλύψουν νέες και σημαντικές ενδείξεις αναφορικά με την αποτελεσματικότητά τους ή τις συνέπειές τους. Οι μη αιτιολογημένες εκθέσεις απαγορεύονται.

⁴²Ως πρακτικές καλούνται όλες οι δραστηριότητες των ανθρώπων που μπορούν να αυξήσουν τη έκθεση των ατόμων σε ιονίζουσα ακτινοβολία πέρα από αυτήν στην οποία υποβάλλονται από την υφιστάμενη ακτινοβολία του φυσικού υποστρώματος του περιβάλλοντος (φυσικές πηγές ακτινοβολίας). Στις πρακτικές εντάσσονται οι δραστηριότητες που περιλαμβάνουν τη χρήση ακτινοβολιών στην ιατρική. Αντίθετες των πρακτικών είναι οι παρεμβάσεις. Οι παρεμβάσεις ορίζονται ως οι ανθρώπινες δραστηριότητες που αποσκοπούν στη μείωση της έκθεσης των ατόμων από υπάρχουσες πηγές ή καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Πηγή από: Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής και άλλοι (2010), Μαθήματα Ακτινοπροστασίας για χειριστές ιατρικών μηχανημάτων ιοντιζουσών ακτινοβολιών, κεφ. 8, σελ. 36.

Η αρχή της βελτιστοποίησης αναφέρει πως τόσο οι πηγές όσο και τα μηχανήματα παραγωγής ακτινοβολιών στα πλαίσια μιας πρακτικής, θα πρέπει να προσφέρουν κάτω από τις επικρατούσες συνθήκες λειτουργίες τους την καλύτερη δυνατή προστασία και ασφάλεια με τέτοιο τρόπο ώστε το μέτρο της ενεχόμενης έκθεσης, η πιθανότητα μη αναμενόμενης έκθεσης και ο αριθμός των εκτεθειμένων ατόμων να είναι τόσο μικρά όσο αυτό είναι λογικά εφικτό λαμβάνοντας υπόψιν τις δυνατότητες της υπάρχουσα τεχνολογίας, τα πορίσματα κόστους-οφέλους και κάθε κοινωνικό και κοινωνικοοικονομικό παράγοντα. Σύμφωνα με την αρχή της βελτιστοποίησης όλες οι αιτιολογημένες ιατρικές εκθέσεις στην ιονίζουσα ακτινοβολία υπακούν στην αρχή της ALARA (As Low As Reasonably Achievable) που σημαίνει: όσο χαμηλότερα όσο αυτό είναι λογικά εφικτό.

Η ALARA είναι μια απαίτηση του νόμου δηλαδή όλες οι εγκαταστάσεις που διαθέτουν άδειες ραδιενεργών υλικών πρέπει να διαθέτουν ένα επίσημο πρόγραμμα ALARA. Μπορεί να οριστεί ως επαγγελματικό πρότυπο και να ασκείται με τη διατήρηση όλων των δόσεων, των μολύνσεων και άλλων κινδύνων όσο χαμηλότερα όσο αυτό είναι λογικά εφικτό. Αν και η υπέρβαση μιας κατευθυντήριας γραμμής ALARA δεν αποτελεί παραβίαση του νόμου, μπορεί ωστόσο να σημαίνει ένδειξη ότι χρειάζεται τροποποίηση των πρακτικών έτσι ώστε αυτές να αντανακλούν καλύτερα τις πρακτικές διαχείρισης της ALARA.

Τα Διαγνωστικά Επίπεδα Αναφοράς (ΔΕΑ) αποτελούν το πλαίσιο ασφάλειας στην έκθεση ιονίζουσα ακτινοβολίας με σκοπό την ακτινοπροστασία των εξεταζόμενων και του ιατρικού και παραϊατρικού προσωπικού. Τα ΔΕΑ σχετίζονται με τη βελτιστοποίηση της ακτινοπροστασίας του ασθενή που πραγματοποιεί μια αναγκαία και αιτιολογημένη έκθεση με χρήση ιονίζουσας ακτινοβολίας σύμφωνα με τις αρχές ακτινοπροστασίας. Τα όρια που ορίζονται από τους διεθνείς οργανισμούς έχουν συμβουλευτικό χαρακτήρα και δεν είναι δεσμευτικά σε περίπτωση υπέρβασής τους.

Η τελευταία αναθεώρηση των BSS (IAEA 2011) και η σχετική Οδηγία (2013/59/Euratom, 2013) της Euratom επεκτείνουν την αναγκαιότητα της υιοθέτησης ΔΕΑ σε εθνικό επίπεδο και σε ακτινοσκοπικά καθοδηγούμενες επεμβατικές διαδικασίες.

«Όπως αναφέρεται στις Οδηγίες (Directives 97/43/Euratom, 1997) της Euratom, τα ΔΕΑ ορίζονται ως τα επίπεδα δόσης από ιατρικές ακτινοδιαγνωστικές πρακτικές ή στην περίπτωση των ραδιοφαρμάκων, επίπεδα ενεργότητας για τυπικές εξετάσεις που πραγματοποιεί ένα σύνολο ασθενών μέσου μεγέθους ή πρότυπα ομοιώματα (phantoms) από ένα ευρύ φάσμα εξοπλισμών. Αυτά τα επίπεδα δε θα πρέπει να υπερβαίνονται για

συγκεκριμένες διαδικασίες όταν εφαρμόζεται ορθή πρακτική σε σχέση με τις διαγνωστικές και τεχνικές επιδόσεις». Σε εθνικό επίπεδο αυτά τα επίπεδα αναφοράς καθορίζονται με βάση τις υφιστάμενες εφαρμοζόμενες πρακτικές για κάθε εξέταση.

Σύμφωνα με την ICRP οι κατευθυντήριες γραμμές για τον καθορισμό των ΔΕΑ είναι οι παρακάτω:

- Ο περιφερειακός, εθνικός και τοπικός στόχος είναι σαφώς προσδιορισμένος και κατά τέτοιο τρόπο ώστε να συμπεριλαμβάνει και το βαθμό εξειδίκευσης των κλινικών και τεχνικών προδιαγραφών που απαιτούνται για την περάτωση του ιατρικού εγχειρήματος.
- Η επιλεγμένη τιμή των ΔΕΑ βασίζεται σε σχετικά περιφερειακά, εθνικά και τοπικά δεδομένα.
- Η δοσιμετρική ποσότητα που θα χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό των ΔΕΑ πρέπει να μπορεί να μετρηθεί πρακτικά.
- Η ποσότητα που χρησιμοποιείται για τα ΔΕΑ είναι ένα κατάλληλο μέτρο της σχετικής μεταβολής της δόσης στους ιστούς του ασθενούς και κατά συνέπεια της σχετικής μεταβολής του κινδύνου που διατρέχει ο ασθενής από τη συγκεκριμένη μέθοδο ιατρικής απεικόνισης.
- Ο τρόπος με τον οποίο τα ΔΕΑ πρόκειται να εφαρμοστούν στην πράξη είναι ξεκάθαρος.

Τέλος, η αρχή των ορίων δόσεων αναφέρει ότι οι ατομικές εκθέσεις στην ακτινοβολία που οφείλονται στο σύνολο των πηγών ακτινοβολήσεως στα πλαίσια των εγκεκριμένων πρακτικών, πρέπει να υπόκεινται σε όρια δόσεων ή όρια κινδύνων η υπέρβαση των οποίων θεωρείται μη αποδεκτή. Για τους επαγγελματικά εκτεθειμένους το ετήσιο όριο της ενεργού δόσεως είναι κατά μέσο όρο τα 20mSv με μέγιστο όριο τα 50mSv. Κατά τη διάρκεια πέντε συνεχόμενων ετών δε θα πρέπει να ξεπερνά τα 100mSv. Για μεμονωμένα άτομα του κοινού το ετήσιο όριο της ενεργού δόσεως είναι το 1mSv για το σύνολο των εφαρμοζόμενων πρακτικών.

Τα όρια της ενεργού δόσεως αποσκοπούν στον περιορισμό του κινδύνου σε αποδεκτά επίπεδα από τα στοχαστικά αποτελέσματα των ακτινοβολιών των επαγγελματικά εκτεθειμένων και των μεμονωμένων ατόμων του κοινού.

Τα όρια ισοδύναμης δόσης για τους εργαζόμενους που εκτίθενται στην ιονίζουσα ακτινοβολία για το δέρμα και τα άνω και κάτω άκρα ορίζονται στα 500mSv ετησίως, ενώ

για τους φακούς των οφθαλμών στα 150mSv ανά έτος. Τα όρια ισοδύναμης δόσης θεσπίστηκαν προκειμένου να αποτραπούν τα άμεσα αποτελέσματα της ακτινοβολίας.

Οι παραπάνω αρχές ακτινοπροστασίας προβλέπονται στην έκδοση Publication 60 της ICRP (1991) και εφαρμόζονται στα διεθνή BSS (1996), τις οδηγίες της Ε.Ε. το 1996 και το 1997 (96/29/Euratom και 97/43/Euratom) και τους Εθνικούς Κανονισμούς Ακτινοπροστασίας (ΦΕΚ 216B /2001).

5.5 Αρχές, κανονισμοί και μέτρα ακτινοπροστασίας

Οι χειριστές των μηχανημάτων (τεχνολόγοι ακτινολόγοι) που χρησιμοποιούν τα μηχανήματα που εκπέμπουν ιονίζουσα ακτινοβολία για διάγνωση ή για θεραπεία θα πρέπει να γνωρίζουν το τρίπτυχο της ακτινοπροστασίας το οποίο είναι: ο χρόνος, η απόσταση και η θωράκιση.

Ο χρόνος αφορά την ακτινοβολία στην οποία μπορεί να εκτεθεί ο εργαζόμενος κατά τη διάρκεια της εξέτασης του ασθενούς. Η ακτινοβολία που μπορεί να δεχθεί ο εργαζόμενος σχετίζεται θετικά με τη διάρκεια παραμονής του στο ακτινοβολούμενο περιβάλλον. Επομένως, όση περισσότερη ώρα θα εκτεθεί κάποιος στην ακτινοβολία τόσο περισσότερο θα επιβαρυνθεί. Από την πλευρά του εξεταζόμενου ισχύει το ίδιο: όση μεγαλύτερη είναι η χρονική διάρκεια έκθεσής του σε ιονίζουσα ακτινοβολία τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσό δόσης που προσλαμβάνει.

Αναφορικά με την απόσταση, το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, όπως κάθε είδους κύμα (ηχητικό), καθώς διέρχεται μέσω του αέρα εξασθενεί. Η εξασθένιση αυτή είναι εξαρτάται από την απόσταση από την πηγή. Ειδικότερα, η ένταση της δέσμης της ακτινοβολίας είναι αντιστρόφως ανάλογη με την απόσταση που διανύει διότι κατανέμεται σε μεγαλύτερη επιφάνεια. Επίσης, η απόσταση του ασθενούς από την πηγή ακτινοβολίας μειώνει την προσπίπτουσα προς αυτόν δέσμη ακτίνων X και συνδυασμένη με το ρυθμό εκπομπής (ο αριθμός των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται στη μονάδα χρόνου) εκφράζει σχέση αντιστρόφως ανάλογη από αυτή την απόσταση. Ο κανόνας αυτός ισχύει για τις ακτίνες X και γ και τα υψηλής ενέργειας σωματίδια β.

Η θωράκιση αποτελεί βασικό παράγοντα ακτινοπροστασίας. Οι ακτίνες X διακρίνονται για τη μεγάλη διεισδυτικότητά τους. Κάθε υλικό που παρεμβάλλεται στη δέσμη των ακτίνων X απορροφά ένα μέρος της ακτινοβολίας περιορίζοντας την ένταση της δέσμης. Οι ακτίνες X απορροφώνται καλύτερα από υλικά με υψηλού ατομικού αριθμού και κατάλληλου πάχους. Άρα, για την προστασία από τις ακτίνες X απαιτούνται

πυκνότερα υλικά που μπορούν να τις εγκλωβίζουν αποτελεσματικά και να περιορίζουν τη διαρροή τους.

Στα ακτινολογικά, ακτινοθεραπευτικά και πυρηνικά εργαστήρια οι εξεταστικοί χώροι είναι θωρακισμένοι με μόλυβδο (Pb) πάχους τουλάχιστον 1mm που εξασφαλίζει ικανοποιητική απορρόφηση των ακτίνων X χάρη στο μεγάλο ατομικό του αριθμό και στην υψηλή πυκνότητά του και αποτρέπει τη σκέδαση της ιονίζουσας ακτινοβολίας.⁴³ Επιπλέον, ο μόλυβδος είναι εύκαμπτο άρα και εύχρηστο υλικό χωρίς υψηλό κόστος.

Πριν την κατασκευή των χώρων εγκατάστασης συστημάτων παραγωγής ιοντιζουσών ακτινοβολιών, τα σχέδια των χώρων και τα πάχη των προτεινόμενων θωρακίσεων ελέγχονται από την ΕΕΑΕ. Αμέσως μετά την κατασκευή των χώρων και κατά περιόδους διενεργούνται επιτόπιοι έλεγχοι ακτινοπροστασίας των χώρων για τυχόν διαρροές ή υπερβάσεις των ορίων. Πέρα από την ΕΕΑΕ περιοδικές μετρήσεις διενεργεί και ο υπεύθυνος Ακτινοφυσικός.

5.5.1 Η ακτινοπροστασία του προσωπικού

Για την ακτινοπροστασία του προσωπικού είναι αναγκαίο να αξιολογείται η φύση και το μέγεθος του κινδύνου και να εφαρμόζεται η αρχή της βελτιστοποίησης της ακτινοπροστασίας σε όλες τις συνθήκες εργασίας. Ακόμα, οι χώροι εργασίας πρέπει να ταξινομούνται σε διάφορες ζώνες και οι εργαζόμενοι σε διάφορες κατηγορίες με βάση τις προβλεπόμενες ετήσιες δόσεις.

Η εφαρμογή κατάλληλων μέτρων ελέγχου και παρακολούθησης των συνθηκών εργασίας και η ατομική δοσιμέτρηση καθώς και η ιατρική παρακολούθηση των εκτεθειμένων εργαζομένων είναι ζωτικής σημασίας για την προστασία τους. Οι χώροι εργασίας πρέπει να ταξινομούνται σε ζώνες. Οι χώροι εργασίας στους οποίους υφίσταται

⁴³Με τον όρο «σκέδαση» εννοούμε το διασκοπισμό των ακτίνων που ακολουθεί όταν αυτές προσπέσουν σε μικροσκοπικά σωματίδια έτσι ώστε να διαχέονται στο χώρο χωρίς να φαίνονται. Το φαινόμενο της σκέδασης προέρχεται από την αλληλεπίδραση των κυμάτων με την ύλη. Υπάρχουν τέσσερα βασικά είδη σκέδασης ανάλογα με το είδος της κυματικής ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται: η σκέδαση των ακτίνων X που συμβαίνει όταν η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αλληλεπιδρά με τα ηλεκτρόνια, η σκέδαση των ηλεκτρονίων που υλοποιείται όταν τα ηλεκτρονιακά κύματα αλληλεπιδρούν με τα ηλεκτρόνια, η σκέδαση των νετρονίων που πραγματοποιείται όταν τα κύματα των νετρονίων αλληλεπιδρούν με τον ατομικό πυρήνα και τέλος η σκέδαση του φωτός που λαμβάνει χώρα όταν η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία πολώνεται από την ύλη (διάθλαση). Πηγή από: Κουτρομπής Π. Γεώργιος (2003), Ακτινοφυσική 2, κεφ. 12 ,σελ. 132-134.

η πιθανότητα η δόση ιονίζουσας ακτινοβολίας να υπερβεί το 1 mSv ετησίως ταξινομούνται σε ελεγχόμενες και επιβλεπόμενες ζώνες.

Κάθε περιοχή στην οποία ενδέχεται να γίνει υπέρβαση των 6 mSv μέσα σε ένα έτος καλείται ελεγχόμενη ζώνη. Κάθε περιοχή στην οποία ενδέχεται να γίνει υπέρβαση του 1 mSv ετησίως θεωρείται επιβλεπόμενη ζώνη. Ελεγχόμενες ζώνες χαρακτηρίζονται οι ακτινολογικοί και ακτινοθεραπευτικοί θάλαμοι, οι χώροι βραχυθεραπείας, τα εργαστήρια πυρηνικής ιατρικής, οι χώροι διαχείρισης των ραδιοφαρμάκων και των ραδιενεργών καταλοίπων, οι αίθουσες αναμονής των θερμών ασθενών και τα δωμάτια θεραπείας με ραδιενεργό ιώδιο I-131. Οι χώροι των χειριστηρίων των μηχανημάτων έξω από τους θαλάμους και οι υπόλοιποι χώροι των εργαστηρίων στους οποίους η πρόσβαση είναι ελεγχόμενη συνιστούν τις επιβλεπόμενες ζώνες.

Η ελεγχόμενη ζώνη πρέπει να είναι σαφώς οριοθετημένη με κατάλληλη σήμανση και να έχει πρόσβαση μόνο το εξουσιοδοτημένο προσωπικό. Ο υπεύθυνος Ακτινοφυσικός κάθε τμήματος πρέπει να ελέγχει το χώρο εργασίας με μετρήσεις της ραδιενέργειας, των δόσεων και των ρυθμών δόσεων και να καταγράφονται τα αποτελέσματα. Βάσει των αποτελεσμάτων των ελέγχων του Ακτινοφυσικού θα πρέπει να εκδίδονται σχετικές οδηγίες εργασίας. Στην επιβλεπόμενη ζώνη απαιτείται να τοποθετείται κατάλληλη σήμανση, να επιβλέπεται το περιβάλλον εργασίας και να εκδίδονται οδηγίες εργασίας αναλόγως με τον κίνδυνο που απορρέει από τις πηγές ακτινοβολίας.

Οι επαγγελματικά εκτεθειμένοι πρέπει να ενημερώνονται για τους κινδύνους που προκύπτουν από το περιβάλλον εργασίας τους και να τους παρέχεται αδιαλείπτως εκπαίδευση ακτινοπροστασίας. Σε συνεργασία με τον υπεύθυνο Ακτινοφυσικό, οι χειριστές των μηχανημάτων πρέπει:

- να προβαίνουν σε περιοδικό έλεγχο της αποτελεσματικότητας των μέσων και των τεχνικών προστασίας
- να βαθμονομούν συχνά τα όργανα μέτρησης των πεδίων των ακτινοβολιών και της ραδιενεργού ρύπανσης και να ελέγχουν τακτικά την καλή κατάσταση λειτουργίας τους και να τα χρησιμοποιούν ορθά
- να παρακολουθούν συστηματικά την ατομική δοσιμέτρηση

Οι εκτεθειμένοι εργαζόμενοι για λόγους επίβλεψης και παρακολούθησης με κριτήριο την ενεργό δόση που ενδέχεται να δεχθούν, διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: στην κατηγορία Α κατατάσσονται οι επαγγελματικά εκτεθειμένοι που πιθανολογείται να δεχθούν ενεργό δόση μεγαλύτερη από 6 mSv ετησίως και στην κατηγορία Β

ταξινομούνται οι εκτεθειμένοι εργαζόμενοι που είναι πιθανόν να εκτεθούν σε ενεργό δόση από 1 mSv ως 6 mSv το έτος.

Για τους επαγγελματικά εκτεθειμένους που ανήκουν στην κατηγορία Α κρίνεται αναγκαίο να εκτιμώνται συστηματικά οι ατομικές δόσεις και τούτο επιτυγχάνεται με τη χρήση των ατομικών δοσιμέτρων. Στη χώρα μας για την ατομική δοσιμέτρηση απαραίτητα εργαλεία συνιστούν τα ατομικά δοσίμετρα θερμοφωταύγειας που διατίθενται και μετρώνται κάθε μήνα από το τμήμα δοσιμέτρησης προσωπικού της ΕΕΑΕ. Τα δοσιμετρικά στοιχεία καταχωρούνται και αρχειοθετούνται για χρονικό διάστημα 30 ετών μετά το τέλος της εργασίας που συνεπάγεται έκθεση στην ιονίζουσα ακτινοβολία.

Οι εργαζόμενοι που κατατάσσονται στην κατηγορία Β πρέπει να υπολογίζεται η δόση που λαμβάνουν είτε με συλλογική ή με ατομική δοσιμέτρηση. Αν υπάρξει υπέρβαση των ΔΕΑ και των ορίων δόσεων πραγματοποιείται διεύρυνση των αιτιών και αξιολόγηση των πρακτικών που εφαρμόζουν οι εργαζόμενοι από την ΕΕΑΕ σε συνεργασία με τον υπεύθυνο Ακτινοφυσικό του εκάστοτε τμήματος.

5.5.2 Η ακτινοπροστασία των εξεταζόμενων

Σύμφωνα με τους κανονισμούς ακτινοπροστασίας στις ιατρικές εκθέσεις με ακτινοβολία συμπεριλαμβάνονται: η έκθεση των ασθενών που υποβάλλονται σε ιατρική διάγνωση ή θεραπευτική αγωγή, η έκθεση των ατόμων στα πλαίσια προγραμμάτων προληπτικής ιατρικής σε φυσιολογικές ομάδες πληθυσμού που χαρακτηρίζονται ως υψηλού κινδύνου για την εμφάνιση κάποιας νόσου και τέλος η έκθεση των ατόμων λόγω ιατρικής παρακολούθησης στα πλαίσια της εργασίας τους.

Η αρχή της αιτιολόγησης στις ιατρικές εκθέσεις και διακρίνεται στην αρχή της αιτιολόγησης σε επίπεδο πρακτικής και στην αρχή της αιτιολόγησης σε επίπεδο εξεταζόμενου ή θεραπευόμενου. Όσον αφορά το επίπεδο πρακτικής, οι διαγνωστικές και θεραπευτικές τεχνικές δικαιολογούνται σε εθνικό επίπεδο ως προς ο προσδοκώμενο όφελος από ειδική επιτροπή εμπειρογνομόνων του Υπουργείου Υγείας.

Αναφορικά με το επίπεδο εξεταζόμενου ή θεραπευόμενου, η εφαρμογή μιας πρακτικής πρέπει να αιτιολογείται κλινικά λαμβάνοντας υπόψιν στους στόχους της έκθεσης και τα κλινικά γνωρίσματα του εκτεθειμένου. Ο ιατρός που επιτελεί την έκθεση φέρει την τελική ευθύνη για την αιτιολόγησή της και την αποφυγή της περιττής έκθεσης.

Η αρχή της βελτιστοποίησης εφαρμόζεται στις ιατρικές εκθέσεις και η διαδικασία υλοποίησής της εμπεριέχει την επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού και τη διασφάλιση

της ποιότητας των χρησιμοποιούμενων μεθόδων. Η διασφάλιση της ποιότητας περιλαμβάνει:

- τυποποιημένα πρωτόκολλα για την εφαρμογή των διαγνωστικών και θεραπευτικών τεχνικών
- τυποποιημένα πρωτόκολλα για διαγνωστικών και ακτινοθεραπευτικών τεχνικών για την ακτινοπροστασία των ευαίσθητων ομάδων πληθυσμού, π.χ. έγκυες και παιδιά
- γραπτά πρωτόκολλα ελέγχων ποιότητας των μηχανημάτων παραγωγής και ανίχνευσης των ιονιζουσών ακτινοβολιών
- την εκτίμηση και αξιολόγηση των δόσεων του ασθενή ή της χορηγούμενης ραδιενέργειας
- την αδιάλειπτη εκπαίδευση του προσωπικού και τη χρήση των ΔΕΑ

Απαραίτητη προϋπόθεση για την ακτινοπροστασία των εξεταζόμενων είναι η ύπαρξη του κατάλληλου ακτινοπροστατευτικού εξοπλισμού που είναι οι προστατευτικές καλύπτρες οργάνων, συστήματα ακινητοποίησης ασθενών (για μη συνεργάσιμους ασθενείς). Επιπροσθέτως, αναγκαία συνθήκη ακτινοπροστασίας είναι η ύπαρξη ειδικά καταρτισμένου προσωπικού για τις ευαίσθητες ομάδες του πληθυσμού, τις γυναίκες και τα παιδιά.

«Όπως αναφέρεται στον κανονισμό ακτινοπροστασίας ΦΕΚ 216/Β/6.03.2001 (παράγραφος 1.1.4.8.2), τα ιατρικά εργαστήρια ακτινοβολιών πρέπει να διαθέτουν ειδικά γραπτά πρωτόκολλα εργασίας για την προστασία και τη δοσιμετρία τόσο των γυναικών σε αναπαραγωγική ηλικία, εγκυμοσύνη ή γαλουχία όσο και του κυοφορούμενου ή θηλάζοντος παιδιού. Τα πρωτόκολλα αυτά εκδίδονται από την Ειδική Επταμελή Επιτροπή (1.1.4.2) του Υπουργείου Υγείας».

«Σύμφωνα με τον κανονισμό ακτινοπροστασίας ΦΕΚ 216/Β/6.03.2001 (παράγραφοι 1.1.4.8.3 και 3.5.3.), στα ιατρικά εργαστήρια ακτινοβολιών πρέπει να υπάρχουν ανηρτημένες σε εμφανή θέση προειδοποιητικές πινακίδες για την ανάγκη ενημέρωσης από την εξεταζόμενη του θεράποντος ιατρού για την περίπτωση εγκυμοσύνης ή γαλουχίας».

5.5.3 Η ακτινοπροστασία των εγκύων ασθενών

Στην εμβρυική, τη βρεφική, τη νηπιακή και την παιδική ηλικία συντρέχουν μεγαλύτεροι κίνδυνοι κατά την έκθεση στην ιοντίζουσα ακτινοβολία σε σύγκριση με τους ενήλικες. Όπως έχει προαναφερθεί, το αναπτυσσόμενο έμβρυο διακρίνεται από υψηλή ακτινοευαισθησία εξαιτίας του κυτταρικού του συστήματος που αποτελείται από ταχέως διαχωρισμένα κύτταρα με παράλληλα καλή τροφοδοσία αίματος και οξυγόνου. Το ίδιο ισχύει και για τη βρεφική, τη νηπιακή και την παιδική ηλικία όπου τα κύτταρα πολλαπλασιάζονται συνεχώς (μεγάλος πληθυσμός των κυττάρων βρίσκονται σε φάση πολλαπλασιασμού).

Επομένως, οι συντελεστές επικινδυνότητας αυξάνονται λόγω της ύπαρξης μεγάλων πληθυσμών ανώριμων και αδιαφοροποίητων κυττάρων, η προσβολή των οποίων, εκτός από την αναστολή της ωρίμανσής τους σε ιστούς, αυξάνει σημαντικά την πιθανότητα παιδικών καρκίνων μειώνοντας το προσδόκιμο επιβίωσης.⁴⁴ Εκτενέστερα, για το κυοφορούμενο έμβρυο υφίστανται ειδικές διατάξεις ακτινοπροστασίας σε περίπτωση που καθίσταται αναγκαίο η μητέρα να υποβληθεί σε ιατρική διαγνωστική εξέταση ή θεραπεία με χρήση ιοντίζουσών ακτινοβολιών.

Το προσωπικό του ακτινολογικού εργαστηρίου υποχρεούται να ρωτά τις γυναίκες που βρίσκονται σε αναπαραγωγική ηλικία αν υπάρχει περίπτωση εγκυμοσύνης προτού ξεκινήσει ο διαγνωστικός έλεγχος, ειδικά όταν πρόκειται για ακτινογραφίες κοιλίας και λεκάνης. Επιπλέον, απαιτείται η ανάρτηση πινακίδας στην αίθουσα αναμονής με περιεχόμενο ανάλογο με την ερώτηση του προσωπικού προς την εξεταζόμενη.

Σύμφωνα με τα στοιχεία της ICRP, χιλιάδες έγκυες γυναίκες εκτίθενται σε ιονίζουσα ακτινοβολία κάθε χρόνο λόγω απαραίτητων ιατρικών διαγνωστικών εξετάσεων. Ορισμένες από αυτές τις ασθενείς ανακαλύπτουν την εγκυμοσύνη τους αφότου έχουν εκτεθεί στην ιονίζουσα ακτινοβολία. «Όπως αναφέρουν οι Mossman και Hill (1982) στην έρευνά τους, το 1 % των γυναικών αναπαραγωγικής ηλικίας που υποβάλλονται σε ακτινοδιαγνωστικές εξετάσεις κοιλίας-πυέλου αγνοούσαν τη στιγμή της εξέτασης την ύπαρξη της εγκυμοσύνης τους».

⁴⁴Τα αδιαφοροποίητα κύτταρα είναι τα βλαστοκύτταρα τα οποία έχουν την ικανότητα να αναπαράγονται και πολλαπλασιάζονται αδιαλείπτως καθώς και να διαφοροποιούνται μετατρέποντας σε κύτταρα διαφόρων ιστών και οργάνων ενός οργανισμού. Με τον όρο «βλαστικά» εννοούμε ότι τα κύτταρα αυτά συνιστούν την παρακαταθήκη για τη δημιουργία - βλάστηση άλλων κυττάρων. Τα βλαστικά είναι τα κυρίαρχα κύτταρα του σώματος που ανανεώνονται και μετατρέπονται στα κύτταρα που σχηματίζουν το σύνολο των ιστών, των οργάνων και των συστημάτων του ανθρώπινου σώματος. Πηγή από:

<http://www.somaomotimon.uoa.gr/fileadmin/somaomotimon.uoa.gr/uploads/doc/dialexeis/BLASTOKYTTARA.pdf>

Για τις γυναίκες αναπαραγωγικής ηλικίας που πρέπει να εξετασθούν ακτινοδιαγνωστικώς συνίσταται η εφαρμογή προληπτικού ελέγχου κύησης (αιματολογικές εξετάσεις: ορού ούρων Β' χωριακής) προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των ακτινογραφιών σε εγκύους που αγνοούν ότι κυοφορούν. Ωστόσο κάθε διαδικασία εφαρμογής προληπτικού ελέγχου μπορεί να μην εγγυάται 100% την ανίχνευση των ενδεχόμενων κυήσεων.

Τα αποτελέσματα των επιδράσεων της ιονίζουσας ακτινοβολίας στο κυοφορούμενο έμβρυο ποικίλλουν ανάλογα με τη βδομάδα κύησης. Στις δύο πρώτες βδομάδες της κύησης η άμεση ακτινοβόληση του εμβρύου με δόσεις άνω των 2 Gy μπορεί να προκαλέσει την απορρόφηση ή την αποβολή του, αλλά όχι δυσπλασίες. Σοβαρές δυσπλασίες πολλών οργάνων όμως θα εμφανισθούν κατά την ακτινοβόληση μεταξύ της 3^{ης} και 11^{ης} βδομάδας σχεδόν σε όλα τα παιδιά που θα γεννηθούν επειδή στην περίοδο αυτή έχει αρχίσει η οργανογένεση. Σε περίπτωση δόσης 0,01 Sv (1 rem) υπάρχει 47% πιθανότητα το παιδί να εμφανίσει καρκίνο κατά την παιδική ηλικία.

Η έκθεση στην ιονίζουσα ακτινοβολία μεταξύ της 11^{ης} και 16^{ης} εβδομάδας θα προξενήσει μικρές ανωμαλίες στους οφθαλμούς, στα γεννητικά όργανα, στο σκελετό αλλά ως επί τω πλείστον διανοητική καθυστέρηση στην ανάπτυξη. Ύστερα από την 16^η βδομάδα έως και την 20^η η ακτινοβόληση του κυοφορούμενου εμβρύου δύναται να επιφέρει μικρού βαθμού μικροκεφαλία, διανοητική καθυστέρηση και παρεμπόδιση της ανάπτυξης. Τέλος, έπειτα από την 30^η βδομάδα η έκθεση του εμβρύου στην ιονίζουσα ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει λειτουργικές ανωμαλίες, αλλά όχι μακροσκοπικές ανωμαλίες που θα οδηγήσουν σε αναπηρία.

Ο κανόνας των δέκα ημερών υποδεικνύει ότι το ασφαλέστερο χρονικό διάστημα που πρέπει να πραγματοποιηθεί μια ακτινογραφία λεκάνης είναι οι πρώτες δέκα ημέρες από την αρχή της εμμήνου ρήσεως. Αν το ωάριο ακτινοβοληθεί επτά βδομάδες πριν την ωορρηξία η πιθανότητα γενετικής βλάβης ανά rem μπορεί να είναι 1/1000.

Η έκθεση εγκύων γυναικών ή γυναικών σε αναπαραγωγική ηλικία (που ενδέχεται να κυοφορούν) σε διαγνωστικές εξετάσεις με ακτίνες X προκαλεί ιδιαίτερη ανησυχία τόσο στη μέλλουσα μητέρα και στην οικογένειά της όσο και στους θεράποντες ιατρούς και τεχνολόγους ακτινολόγους σχετικά με τις επιπτώσεις της ιονίζουσας ακτινοβολίας στο ιδιαιτέρως ακτινοευαίσθητο έμβρυο. Ως εκ τούτου, κάθε διαγνωστική εξέταση στην οποία υποβάλλεται μια έγκυος ασθενής πρέπει να είναι αιτιολογημένη και βελτιστοποιημένη και σε κάθε περίπτωση πρέπει να σταθμίζεται το όφελος από τη διαδικασία για τη μητέρα με τον ενδεχόμενο κίνδυνο για το έμβρυο εξαιτίας της

ακτινοβολίας. Άρα, σε περίπτωση που κρίνεται αναγκαίο η έγκυος ασθενής να υποβληθεί σε ιατρική διαγνωστική εξέταση με χρήση ιοντιζουσών ακτινοβολιών πρέπει:

- Να ερευνάται αν η ακτινολογική εξέταση είναι αναγκαία.
- Να αναβληθεί η εξέταση αν χρονικώς η κύηση βρίσκεται μεταξύ της 8^{ης} και της 16^{ης} βδομάδας.
- Να αναζητηθούν κατάλληλες εναλλακτικές διαγνωστικές μέθοδοι με χαμηλότερη ή μηδενική ακτινική επιβάρυνση, όπως η απεικόνιση με υπερήχους (US: Ultrasound) ή μαγνητικό συντονισμό (MRI: Magnetic Resonance Imaging), αν αυτό δύναται.
- Να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα ακτινοπροστασίας όσον αφορά την επιλογή των στοιχείων (kV: εφαρμοζόμενη τάση και mAs) που θα χρησιμοποιηθούν για την ακτινολογική λήψη και να περιοριστεί το μέγεθος του πεδίου ακτινοβολήσης (δέσμη ακτίνων X) εφόσον πρέπει να πραγματοποιηθεί η εξέταση.⁴⁵ Επιπρόσθετα θα πρέπει να περιοριστεί ο αριθμός των ακτινογραφιών, να υπολογιστεί η δόση που αναμένεται να λάβει το έμβρυο και ο ακτινογενής κίνδυνος για αυτό και να ενημερωθεί πλήρως η μέλλουσα μητέρα και η οικογένειά της και να δώσει γραπτώς τη συγκατάθεσή της για την εκτέλεση της εξέτασης.
- Να χρησιμοποιούνται προστατευτικά τεμάχια μολύβδου (μολύβδινη ποδιά) ή ειδικά προστατευτικά για την προστασία του εμβρύου.

Η άμβλωση συζητείται όταν το έμβρυο λάβει δόση μεγαλύτερη από 100 mSv (10 rem) ή μεγαλύτερη από 50 mSv (5 rem) για την περίοδο της 8^{ης} έως και 16^{ης} βδομάδας της κύησης. «Όπως αναφέρεται στον κανονισμό ακτινοπροστασίας ΦΕΚ 216/Β/6.03.2001 (παράγραφος 3.7.3), σε περίπτωση εγκυμοσύνης πρέπει να γίνονται μόνο οι τελείως απαραίτητες ακτινολογικές εξετάσεις και αφού προηγουμένως έχει εξεταστεί το ενδεχόμενο άλλων εναλλακτικών τεχνικών. Πριν από την εξέταση ο

⁴⁵Στα ακτινολογικά εργαστήρια χρησιμοποιούνται μηχανήματα με λυχνία παραγωγής ακτίνων X για την επίτευξη των διαγνωστικών εξετάσεων. Οι ακτίνες X παράγονται όταν δέσμες ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας προσπίπτουν σε υλικό υψηλού ατομικού αριθμού. Ο μηχανισμός παραγωγής γίνεται με τον ιονισμό και την ακτινοβολία πέδησης. Όλη η διάταξη βρίσκεται σε γυάλινο κέλυφος σε συνθήκες υψηλού κενού. Σε δύο μέταλλα υψηλού ατομικού αριθμού και σημείου τήξεως εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού που καλείται kV(κιλοβόλτ). Η ενέργεια της δέσμης των ακτίνων X, δηλαδή η διεισδυτική της ικανότητα εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη τάση (διαφορά δυναμικού) μεταξύ ανόδου και καθόδου της λυχνίας. Ο αριθμός των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται από την κάθοδο και έλκονται από την άνοδο στη μονάδα του χρόνου αντιπροσωπεύει το ηλεκτρικό ρεύμα (ανοδικό ρεύμα) που μετράται σε mA. Το γινόμενο mAs είναι το γινόμενο του ρεύματος επί το χρόνο και λέγεται έκθεση. Το mAs είναι ενδεικτικό του αριθμού των φωτονίων που παρήγαγε η λυχνία. Πηγή από: Dowsett J. David et al (2006), The Physics of Diagnostic Imaging 2nd edition, p. 97-98.

σύμβουλος ή ο υπεύθυνος ακτινοπροστασίας εκτιμά τη δόση στο έμβρυο και τους παράγοντες επικινδυνότητας και προτείνει τα απαραίτητα μέτρα ακτινοπροστασίας».

5.6 Η ακτινοπροστασία κατά τις εργασιακές πρακτικές

Οι παράγοντες που συμβάλουν στην ορθή εφαρμογή της ακτινοπροστασίας των εργαζομένων που εκτίθενται στην ιοντίζουσα ακτινοβολία αφορούν τον ακτινοπροστατευτικό εξοπλισμό, την κατάλληλη διαρρύθμιση των χώρων εργασίας και τις ακολουθούμενες εργασιακές πρακτικές, δηλαδή τον τρόπο με τον οποίο εργάζεται το προσωπικό.

Ο βασικός ακτινοπροστατευτικός εξοπλισμός αποτελείται από το ατομικό δοσίμετρο, την ακτινολογική ποδιά από μόλυβδο και το μολύβδινο προστατευτικό του θυρεοειδούς. Το ατομικό δοσίμετρο τοποθετείται βάση των ανάλογων οδηγιών που το συνοδεύουν και πάνω από την ακτινολογική ποδιά από μόλυβδο εφόσον αυτή χρησιμοποιείται. Το ατομικό δοσίμετρο δεν πρέπει να χρησιμοποιείται από άλλα άτομα. Τα δοσίμετρα ανανεώνονται κάθε μήνα και τα αποτελέσματα αυτών κοινοποιούνται εγγράφως στο χώρο εργασίας και υπάρχουν πάντα σε αρχείο εντός του εργαστηρίου.

Οι τοίχοι των χώρων όπου εκτελούνται οι διαγνωστικές και οι θεραπευτικές εξετάσεις, θωρακίζονται με μόλυβδο ή σκυρόδεμα και το παράθυρο παρατήρησης του ασθενή όπου βρίσκεται στο χώρο του χειριστηρίου του μηχανήματος, κατασκευάζεται από μολυβδύαλο (κρύσταλλος με ψήγματα μολύβδου). Το πάχος του φύλλου του μολύβδου που θα τοποθετηθεί στις προαναφερόμενες επιφάνειες υπολογίζεται από τον υπεύθυνο Ακτινοφυσικό του εργαστηρίου ανάλογα με το φόρτο εργασίας, τη θέση των συστημάτων ακτίνων X εντός του θαλάμου, το είδος του συστήματος ακτίνων X που είναι προς εγκατάσταση λαμβάνοντας υπόψιν τη μέγιστη δυνατή ενέργεια που θα χρησιμοποιείται (μέγιστα kV) και τα θεσμοθετημένα όρια δόσης για κάθε περιοχή.

Η διεξαγόμενη μελέτη από τον Ακτινοφυσικό θα πρέπει να ελεγχθεί και να εγκριθεί από την ΕΕΑΕ και να τηρηθεί πιστά κατά την κατασκευή του εργαστηρίου. Μολονότι υπάρχει επαρκής θωράκιση περιμετρικά του ακτινολογικού θαλάμου, ένα μικρό ποσοστό της ακτινοβολίας τη διαπερνά και διαχέεται στους γύρω χώρους καθότι είναι φύση αδύνατο να μηδενιστεί η ακτινοβολία που διέρχεται από ένα υλικό. Η σχετική νομοθεσία καθώς και οι επιτρεπόμενες και οι επιβλεπόμενες ζώνες καθορίζουν το επιτρεπτό επίπεδο ακτινοβολίας που διαχέεται στους χώρους περίξ του ακτινολογικού θαλάμου. Επιπλέον, υφίσταται διαρροή ακτινοβολίας από την κεφαλή της λυχνίας του ακτινολογικού μηχανήματος που οφείλεται στην αδυναμία τοποθέτησης θωράκισης στην κεφαλή λόγω

πολύ μεγάλου βάρους. Το μέγιστο επιτρεπτό όριο της ακτινοβολίας που διαρρέεται εντάσσεται στη νομοθεσία ακτινοπροστασίας και αντίστοιχα καθορίζονται οι επιτρεπόμενες και οι επιβλεπόμενες ζώνες.

Τέλος, κατά την πραγμάτωση μιας ακτινολογικής λήψης πρέπει να περιορίζεται το πεδίο ακτινοβόλησης, δηλαδή η δέσμη των ακτίνων X, μόνο στην περιοχή ενδιαφέροντος διότι όσο μεγαλύτερο είναι το πεδίο τόσο αυξάνει ο αριθμός των προσπιπτόντων φωτονίων στο σώμα του ασθενούς και η ακτινοβολία που σκεδάζεται στους γύρω χώρους. Επομένως, ο περιορισμός στο μικρότερο δυνατό πεδίο που απαιτείται για τη μέγιστη διαγνωστική πληροφόρηση σημαίνει περιορισμός της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας που δύναται να διαπεράσει τη θωράκιση και να ακτινοβολήσει το προσωπικό.

Στους χώρους όπου υλοποιείται ακτινοσκόπηση/αγγειογραφία (C-arm) πέρα των προαναφερθέντων ακτινοπροστατευτικών μέτρων και εξοπλισμού απαιτείται και η χρήση γυαλιών από μολυβδύαλο για την προστασία των οφθαλμών.⁴⁶ Για την ακτινοπροστασία του ιατρού που εκτελεί την αγγειογραφία επιβάλλεται η χρήση πετάσματος οροφής από μολυβδύαλο και προστατευτικών γαντιών από μόλυβδο. Το λοιπό προσωπικό που συμμετέχει στην επίτευξη της εξέτασης πρέπει να προστατεύεται με τα ακτινοπροστατευτικά πετάσματα εδάφους.

Σε περίπτωση μη ύπαρξης των τελευταίων, συνίσταται η τήρηση της απόστασης από τη λυχνία. Όπως έχει προαναφερθεί, η απόσταση από την πηγή ακτινοβολίας μειώνει την προσπίπτουσα δέσμη ακτίνων X και συνδυασμένη με το ρυθμό εκπομπής (ο αριθμός των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται στη μονάδα χρόνου) εκφράζει σχέση αντιστρόφως ανάλογη από αυτή την απόσταση (η ένταση της ακτινοβολίας μειώνεται με το τετράγωνο της απόστασης).

Κατά την πραγματοποίηση εξέτασης με φορητό ακτινολογικό μηχάνημα ο τεχνολόγος ακτινολόγος πρέπει να φοράει ακτινολογική ποδιά από μόλυβδο και προστατευτικό

⁴⁶Η ακτινοσκόπηση είναι μια απεικονιστική μέθοδος που χρησιμοποιεί ακτίνες X για τη ζωντανή απεικόνιση σε μόνιτορ του εξεταζόμενου συστήματος. Η δόση που λαμβάνει ο εξεταζόμενος σε σύγκριση με την ακτινογραφία είναι πιο μικρή επιτρέποντας τη συνεχή ακτινοβόληση για τη μελέτη λειτουργικών χαρακτηριστικών. Η ακτινοσκόπηση εφαρμόζεται στην ορθοπεδική κατά το διεγχειρητικό έλεγχο για την ορθή τοποθέτηση των υλικών και στη μελέτη κινητικότητας του πεπτικού συστήματος και της τραχείας. Η αγγειογραφία είναι μια επεμβατικού χαρακτήρα διαγνωστική μέθοδος με την οποία λαμβάνονται εικόνες των αγγείων με σκοπό τη διερεύνηση αγγειακών παθήσεων. Πηγή από: Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής και άλλοι (2010), Μαθήματα Ακτινοπροστασίας για χειριστές ιατρικών μηχανημάτων ιοντιζουσών ακτινοβολιών κεφ.9, σελ. 49-50.

μολυβδούχο κολάρο για το θυρεοειδή. Ακόμη, χρειάζεται ακτινοπροστατευτικό πέτασμα εδάφους ή η τήρηση της απόστασης από τη λυχνία που προϋποθέτει το μήκος του καλωδίου ενεργοποίησης του φορητού ακτινολογικού μηχανήματος να είναι τουλάχιστον 2 μέτρα.

Στα ακτινοθεραπευτικά εργαστήρια η πλειονότητα των εφαρμογών επιτυγχάνεται με τους γραμμικούς επιταχυντές. Ο γραμμικός επιταχυντής είναι ένα μηχάνημα που παράγει ακτινοβολία γ από την πρόσκρουση ηλεκτρονίων σε συγκεκριμένα υλικά. Κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης δεν παρίσταται κανένα μέλος του προσωπικού στον θάλαμο θεραπείας πέρα από τον ασθενή. Άρα δεν τίθεται ζήτημα ακτινοπροστασίας καθώς το προσωπικό παρακολουθεί τον εξεταζόμενο με κάμερα εκτός του θαλάμου θεραπείας που είναι επαρκώς θωρακισμένος με τρόπο τέτοιο ώστε ο ρυθμός δόσης να είναι χαμηλότερος των επιτρεπτών ορίων.

Οι εργαζόμενοι στα εργαστήρια ακτινοθεραπείας είναι πιθανό να εκτεθούν σε περιπτώσεις εφαρμογών χρήσεις ραδιενεργών πηγών ακτινοβολίας όπως η βραχυθεραπεία και η τηλεθεραπεία με πηγές Co-60, εφόσον εισέλθουν στο θάλαμο θεραπείας και η πηγή βρίσκεται εκτός θωράκισης. Οι πηγές Co-60 τοποθετούνται σε ειδική θωράκιση και εξέρχονται μόνο για να ακτινοβολήσουν τον ασθενή και ύστερα επιστρέφονται στην αρχική τους θέση. Συμπερασματικά, η δόση που λαμβάνει το προσωπικό στα τμήματα ακτινοθεραπείας είναι ουσιαστικά μηδενική με την προϋπόθεση ότι τηρούνται πιστά όλοι οι κανονισμοί ακτινοπροστασίας.

Η ακτινοπροστασία του προσωπικού στα εργαστήρια Πυρηνικής Ιατρικής είναι πολυπαραγοντική και εξαρτάται από τη θωράκιση των χώρων μέχρι και από τη συνεργασία με τους εξεταζόμενους. Η συνεργασία του προσωπικού με τον υπεύθυνο Ακτινοφυσικό και η συνεχής εκπαίδευση σε ζητήματα ακτινοπροστασίας είναι απαραίτητη για τη βελτιστοποίηση της λειτουργικότητας και της ασφάλειας.

Τα κυριότερα μέτρα ακτινοπροστασίας είναι το ατομικό δοσίμετρο, η χρήση της απλής ιατρικής ποδιάς και τα γάντια μιας χρήσης. Η χρήση της μολύβδινης ακτινολογικής ποδιάς σε συνήθεις πρακτικές στα εργαστήρια Πυρηνικής Ιατρικής δε συμβάλλει στη μείωση της δόσης διότι το πάχος της είναι κατάλληλο για ακτινοβολίες πολύ χαμηλότερης ενέργειας σε σύγκριση με εκείνες που χρησιμοποιούνται εκεί. Επιπλέον, το βάρος της μολύβδινης ακτινολογικής ποδιάς προξενεί κόπωση και δυσχεραίνει την κίνηση και γι' αυτό το λόγω είναι επίφοβη για λάθη και ατυχήματα κατά την εργασία. Για τους παραπάνω λόγους η χρήση της μολύβδινης ακτινολογικής ποδιάς δε συνίσταται στα εργαστήρια Πυρηνικής Ιατρικής.

Για την υλοποίηση μιας εξέτασης Πυρηνικής Ιατρικής (σπινθηρογράφημα) ο ασθενής χορηγείται από τον Πυρηνικό Ιατρό με ραδιοφάρμακο στην αίθουσα χορηγήσεων. Το ραδιοφάρμακο βρίσκεται σε σύριγγα θωρακισμένη με καλύπτρα από μόλυβδο. Οι καλύπτρες για τις σύριγγες χρησιμοποιούνται κατά την παρασκευή των ραδιοφαρμάκων στο θερμό εργαστήριο (hot lab) και κατά τη χορήγησή τους στον ασθενή προσφέροντας ακτινοπροστασία. Ο ρυθμός δόσης είναι σχεδόν 100 φορές μικρότερος όταν χρησιμοποιείται η καλύπτρα.

Η μεταφορά του ραδιοφαρμάκου από το θερμό εργαστήριο στην αίθουσα χορηγήσεων γίνεται μέσα σε θωρακισμένα ειδικά δοχεία. Ο ασθενής αφού του χορηγηθεί το ραδιοφάρμακο αναμένει μέσα σε θωρακισμένη αίθουσα μέχρι την ώρα της εξέτασης ώστε να μην ακτινοβολεί το προσωπικό και το κοινό που βρίσκονται στο τμήμα Πυρηνικής Ιατρικής. Η αίθουσα αυτή λέγεται αίθουσα αναμονής θερμών ασθενών και πρέπει να διαθέτει τουαλέτα αποκλειστικής χρήσης επειδή όλα τα εκκρίματα των θερμών ασθενών είναι ραδιενεργά. Ένα ακόμη μέτρο ακτινοπροστασίας του προσωπικού είναι τα τμήματα που έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να εξασφαλίζουν την ελάχιστη μετακίνηση του ασθενή αφότου του έχει χορηγηθεί ραδιοφάρμακο και την αποφυγή της άσκοπης μεταφοράς του στο διάδρομο.

Στο χώρο όπου βρίσκεται το μηχάνημα με το οποίο πραγματοποιούνται τα σπινθηρογραφήματα με τη γ-κάμερα χρειάζεται η ύπαρξη θωρακισμένου πετάσματος εδάφους που να επιτρέπει την οπτική επαφή με τον ασθενή. Βασικοί παράγοντες ακτινοπροστασίας του προσωπικού κατά την εξέταση είναι ο χρόνος και η απόσταση. Αναφορικά με το χρόνο, οι εργαζόμενοι χρειάζεται να μη βιάζονται διότι μπορεί να γίνουν λάθη και ταυτόχρονα να μη χρονοτριβούν επειδή ακτινοβολούνται αναίτια.

Σε αυτό το σημείο είναι πολύ σημαντική η επικοινωνία με τον ασθενή και η ενημέρωσή του για τη διαδικασία πριν την εξέταση. Όσον αφορά την απόσταση ισχύει ο νόμος του αντιστρόφου τετραγώνου της απόστασης από την πηγή της ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα, η ένταση της δέσμης της ακτινοβολίας είναι αντιστρόφως ανάλογη με την απόσταση που διανύει διότι κατανέμεται σε μεγαλύτερη επιφάνεια. Η πιστή τήρηση των οδηγιών ακτινοπροστασίας και η ορθή χρήση του ειδικού εξοπλισμού είναι προσωπική ευθύνη του εργαζόμενου και καθιστά την εργασία με τα ραδιοϊσότοπα ασφαλή.

Στο θερμό εργαστήριο όπου παρασκευάζονται τα ραδιοφάρμακα με τη χρήση των ραδιοϊσοτόπων πρέπει να γίνεται χρήση του ακτινοπροστατευτικού εξοπλισμού που απαιτείται και είναι:

- Οι κρύπτες: η φύλαξη των ραδιοϊσοτόπων γίνεται σε ειδικά θωρακισμένες κρύπτες.
- Η εστία εργασίας: όλες οι διεργασίες με τα ραδιοϊσότοπα πρέπει να υλοποιούνται εντός της θωρακισμένης εστίας εργασίας. Στο πρόσθιο μέρος της εστίας εργασίας υπάρχει μολυβδύαλος που ακτινοπροστατεύει και ταυτόχρονα επιτρέπει την οπτική παρακολούθηση των κινήσεων. Στο κάτω μέρος της εστίας απαιτείται η τοποθέτηση απορροφητικού χαρτιού για προφύλαξη από πιτσίλισμα του ραδιοφαρμάκου σε περίπτωση ραδιορύπανσης.
- Η θωράκιση της γεννήτριας Tc-99m: η γεννήτρια Tc-99m πρέπει να τοποθετείται στην ειδική θωράκισή της μετά την παραλαβή της. Η προηγούμενη γεννήτρια φυλάσσεται σε χώρο που υποδεικνύει ο Ακτινοφυσικός.
- Οι θωρακίσεις φιαλιδίων: τα φιαλίδια που εμπεριέχουν ραδιοϊσότοπα πρέπει να τοποθετούνται εντός της θωράκισης.
- Οι θωρακισμένες καλύπτρες για σύριγγες: όπως προαναφέραμε οι καλύπτρες για τις σύριγγες χρησιμοποιούνται κατά την παρασκευή των ραδιοφαρμάκων στο θερμό εργαστήριο (hot lab) και κατά τη χορήγησή τους στον ασθενή προσφέροντας ακτινοπροστασία.
- Οι λαβίδες: είναι χρήσιμες για το χειρισμό αθωράκιστου φιαλιδίου που περιέχει ραδιοϊσότοπο επιτρέποντας τη μείωση της δόσης στα δάχτυλα βάση του νόμου του αντιστρόφου τετραγώνου της απόστασης.
- Οι ειδικοί θωρακισμένοι κάδοι καταλοίπων: σε αυτούς απορρίπτεται οτιδήποτε έχει έρθει σε επαφή με ραδιοϊσότοπο, όπως φιαλίδια, βαμβάκι, γάντια, σύριγγες, χαρτιά απορρόφησης.

Σε κάθε εργαστήριο Πυρηνικής Ιατρικής είναι ζωτικής σημασίας να υπάρχουν γραπτοί κανόνες ακτινοπροστασίας και πρωτόκολλα εργασιών: παρασκευή ραδιοφαρμάκων, πρωτόκολλα εξετάσεων, αντιμετώπιση ατυχήματος, απόρριψη ραδιενεργών καταλοίπων. Επιπροσθέτως, είναι αναγκαίο να τηρούνται τα αρχεία με τις χορηγήσεις που έχουν υλοποιηθεί, τα ραδιοϊσότοπα που έχουν παραληφθεί και τα κατάλοιπα που έχουν απορριφθεί.

5.7 Ανακεφαλαίωση

Η ακτινοπροστασία αποσκοπεί στην ικανοποιητική προφύλαξη του προσωπικού και των ασθενών αντισταθμίζοντας τα οφέλη που αποκομίζουν οι τελευταίοι από την έκθεση στην ιοντίζουσα ακτινοβολία κατά τη διαγνωστική ή τη θεραπευτική εξέταση. Η πιστή τήρηση των κανονισμών ακτινοπροστασίας συμβάλλει στην αποφυγή εμφάνισης βλαβών αιτιολογικών επιπτώσεων και στη μείωση της πιθανότητας εμφάνισης στοχαστικών επιδράσεων.

Κάθε διαγνωστική εξέταση πρέπει να παρέχει επαρκείς πληροφορίες για την περιοχή ενδιαφέροντος. Αυτό είναι απαραίτητη προϋπόθεση έτσι ώστε η ακτινολογική λήψη ή το σπινθηρογράφημα να σχετίζεται άμεσα με την κλινική συμπτωματολογία. Βασικό μέλημα είναι να εφαρμοστεί μια τεχνική που θα αποφέρει ένα αξιόπιστο διαγνωστικό αποτέλεσμα με την οποία ο εξεταζόμενος θα λάβει τη μικρότερη δυνατή δόση.

Η έκθεση του προσωπικού στην ιοντίζουσα ακτινοβολία μπορεί να περιοριστεί δραστικά εφόσον έχει επιτευχθεί η κατάλληλη διαρρύθμιση και ο διαχωρισμός των χώρων σε επιτρεπόμενες και επιβλεπόμενες ζώνες και έχουν θωρακιστεί επαρκώς οι εξεταστικοί θάλαμοι και αυτοί όπου βρίσκονται τα χειριστήρια των μηχανημάτων με τα προβλεπόμενα πάχη μολύβδου σύμφωνα με τη μελέτη ακτινοπροστασίας. Επί τούτοις, η χρήση του διαθέσιμου ακτινοπροστατευτικού εξοπλισμού, τα μέτρα ακτινοπροστασίας και η εφαρμογή των κανονισμών ακτινοπροστασίας κατά τις εργασιακές πρακτικές αποτελούν τους βασικούς πυλώνες της προστασίας από τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

6.1 Εισαγωγή

Η έρευνα αποτελεί πρωταρχικής σημασίας διαδικασία για την ανάδειξη, τη συγκρότηση και την προαγωγή των επιστημών μέσω των οποίων επιχειρείται ευρύτερα η βελτίωση των συνθηκών της ζωής του ανθρώπου. Η έρευνα βασίζεται στις μεθόδους που ακολουθούν τόσο οι Επιστήμες συμπεριφοράς όσο και οι Φυσικές επιστήμες και κάποιες από αυτές είναι: η παρατήρηση, η πειραματική μέθοδος, η στατική μέθοδος και η συγκριτική μέθοδος.

Στην παρούσα διπλωματική διατριβή διενεργήθηκε ερευνητική μελέτη με βάση το ερωτηματολόγιο. Το πρακτικό μέρος της διατριβής ξεκίνησε με τη σύνταξη του ερωτηματολογίου ύστερα από μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας ελληνικής και ξενόγλωσσης που αντλήθηκε από επιστημονικά άρθρα και βιβλία και πηγές από το διαδίκτυο περί ακτινοφυσικής, ραδιοβιολογίας, ακτινοπροστασίας καθώς και της νομοθεσίας που έχει θεσπιστεί για την τελευταία.

Αφού απαντήθηκαν τα ερωτηματολόγια, τα αποτελέσματά τους κωδικοποιήθηκαν και αντιστοιγήθηκαν σε κατάλληλες μεταβλητές. Έπειτα τα αποτελέσματα καταχωρήθηκαν στο λογισμικό στατιστικής ανάλυσης της IBM το SPSS statistics για την περαιτέρω ανάλυσή τους. Το δείγμα της έρευνας συνίσταται από επαγγελματίες της υγείας στα εργαστήρια Πυρηνικής Ιατρικής (N=52) των νοσοκομείων Π.Γ.Ν.Α. Αλεξάνδρα και Ν.Ι.Μ.Τ.Σ (Νοσηλευτικό Ίδρυμα Μετοχικού Ταμείου Στρατού) και είναι οι εξής: **πυρηνικοί ιατροί, τεχνολόγοι ακτινολόγοι, νοσηλευτές, βοηθοί θαλάμου και γραμματείς.**

Αρχικά τα αποτελέσματα υποβλήθηκαν σε έλεγχο αξιοπιστίας (reliability analysis) και εν συνεχεία πραγματοποιήθηκε περιγραφική στατιστική (descriptive statistics) και ανάλυση των δεδομένων και ανάλυση διασταύρωσης (crosstabulation) επιλεγμένων ερωτήσεων με κριτήρια τη γνώση των ερωτηθέντων περί ακτινοπροστασίας και των εργασιακών πρακτικών σύμφωνα με τους κανονισμούς ακτινοπροστασίας με παράγοντες το φύλο προκειμένου να μελετηθεί η σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών.

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν ο σκοπός, η μεθοδολογία, ο τόπος και ο χρόνος διεξαγωγής της μελέτης και η δομή και η σύνταξη του ερωτηματολογίου. Ακολούθως, θα γίνει η περιγραφική στατιστική και ανάλυση των δεδομένων της έρευνας και η παράθεση των αποτελεσμάτων. Στο τέλος του κεφαλαίου, θα εξαχθούν τα συμπεράσματα της ερευνητικής μελέτης και θα διατυπωθούν οι ανάλογες προτάσεις.

6.2 Ο σκοπός της ερευνητικής μελέτης

Η παρούσα ερευνητική μελέτη αποσκοπεί στην εκτίμηση του επιπέδου γνώσεων του προσωπικού των εργαστηρίων Πυρηνικής Ιατρικής των νοσοκομείων Π.Γ.Ν.Α. Αλεξάνδρα και Ν.Ι.Μ.Τ.Σ σε θέματα ακτινοφυσικής, ακτινοπροστασίας και στις εργασιακές πρακτικές όπως προβλέπονται από τους κανονισμούς ακτινοπροστασίας. Επί τούτου, με τη διεξαγωγή της έρευνας διερευνάται η ανάγκη για περαιτέρω ενημέρωση του προσωπικού στα παραπάνω ζητήματα.

Τα αποτελέσματα της μελέτης ευελπιστούμε να συνεισφέρουν στη βελτίωση του επιπέδου των γνώσεων και των εργασιακών πρακτικών σύμφωνα με τους κανόνες ακτινοπροστασίας των εργαζομένων στα εργαστήρια Πυρηνικής Ιατρικής των νοσοκομείων Π.Γ.Ν.Α. Αλεξάνδρα και Ν.Ι.Μ.Τ.Σ.

6.3 Η μεθοδολογία της ερευνητικής μελέτης

Ο πληθυσμός στόχος είναι το ιατρικό, παραϊατρικό και λοιπό προσωπικό των τμημάτων Πυρηνικής Ιατρικής των νοσοκομείων Π.Γ.Ν.Α. Αλεξάνδρα και Ν.Ι.Μ.Τ.Σ. Η έρευνα διενεργήθηκε χρησιμοποιώντας ως ερευνητικό εργαλείο το ερωτηματολόγιο. Διανεμήθηκαν 65 ερωτηματολόγια στα τμήματα των παραπάνω νοσοκομείων. Το δείγμα της έρευνας συνίσταται από N=52 επαγγελματίες υγείας που είναι, όπως προαναφέρθηκε, ανά αντικείμενο εργασίας: πυρηνικοί ιατροί, τεχνολόγοι ακτινολόγοι, νοσηλεύτες, βοηθοί θαλάμου και γραμματείς.

Τα ερωτηματολόγια συμπληρώθηκαν εμπιστευτικά και ανώνυμα από τους λειτουργούς της υγείας τηρώντας πιστά τους κανόνες εχεμύθειας, προστασίας των προσωπικών δεδομένων και με σεβασμό απέναντι στην κάθε άποψη. Κατά αυτόν τον τρόπο εξασφαλίστηκε η ελευθερία διατύπωσης των απόψεων σε σχέση με τα ερωτήματα. Για την εκπόνηση της διατριβής και την υλοποίηση της ερευνητικής μελέτης αξιοποιήθηκαν πηγές από την ελληνική και ξενόγλωσση βιβλιογραφία, από επιστημονικά άρθρα και από το διαδίκτυο.

6.3.1 Ο τόπος και ο χρόνος διεξαγωγής της μελέτης

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στα εργαστήρια Πυρηνικής Ιατρικής των νοσοκομείων Πανεπιστημιακό Γενικό Νοσοκομείο Αθηνών Αλεξάνδρα (Π.Γ.Ν.Α. Αλεξάνδρα) και Νοσηλευτικό Ίδρυμα Μετοχικού Ταμείου Στρατού (Ν.Ι.Μ.Τ.Σ) στην Αθήνα στο νομό Αττικής. Η μελέτη διεξήχθη σε χρονικό διάστημα μιας βδομάδας (2-9 Σεπτεμβρίου 2019).

6.4 Η δομή και η σύνταξη του ερωτηματολογίου

Το ερωτηματολόγιο δομείται από δύο μέρη: τα δημογραφικά χαρακτηριστικά των ερωτηθέντων και τις ερωτήσεις που συνιστούν τον πυρήνα του και σχετίζονται άμεσα με το υπό διερεύνηση θέμα. Η πρώτη σελίδα του ερωτηματολογίου αφορά τη συλλογή δημογραφικών στοιχείων και αποτελείται από 5 ερωτήσεις. Στις υπόλοιπες τρεις σελίδες καταγράφονται οι ερωτήσεις που αποτιμούν το θεωρητικό υπόβαθρο των επαγγελματιών υγείας σε θέματα ακτινοφυσικής, ακτινοπροστασίας και τις γνώσεις που αφορούν τις εργασιακές πρακτικές όπως προβλέπονται από τους κανονισμούς ακτινοπροστασίας.

Οι ερωτήσεις που καλούνται να απαντήσουν οι λειτουργοί υγείας είναι πολλαπλής επιλογής κλειστού τύπου. Οι απαντήσεις δίδονται με τη μορφή της κλίμακας τύπου Likert με 5 βαθμίδες: «Σίγουρα», «Πολύ πιθανό», «Αρκετά πιθανό», «Ελάχιστο πιθανό», «Καθόλου πιθανό».⁴⁷ Το παρόν ερωτηματολόγιο συντάχθηκε υπηρετώντας τον επιστημονικό στόχο που τέθηκε και οδήγησε στην πραγμάτωση της παρούσας διατριβής.

6.5 Περιγραφική στατιστική και ανάλυση δεδομένων

⁴⁷ Η κλίμακα Likert αποτελεί μια κλίμακα εκτίμησης απόψεως ή συμπεριφοράς. Πρόκειται για υποκατηγορία της τακτικής κλίμακας. Η κλίμακα Likert ζητά από τον ερωτώμενο να δείξει το βαθμό συμφωνίας ή διαφωνίας του σε ορισμένες προτάσεις-δηλώσεις. Διατυπώθηκε από τον Αμερικανό ψυχολόγο Rensis Likert το 1932, έχει διεθνή απήχηση και συγκροτείται από συγκεκριμένη έκφραση του λόγου στους επιμέρους χαρακτηρισμούς οι οποίοι συντίθενται από δύο αντίρροπες κατευθύνσεις μεταβολής αρνητική-θετική εξέλιξη: πολύ δυσαρεστημένος, μάλλον δυσαρεστημένος, αδιάφορο, μάλλον ικανοποιημένος, πολύ ικανοποιημένος ή με διαφορετικό επιστημονικό προσανατολισμό: Σίγουρα, πολύ πιθανό, αρκετά πιθανό, ελάχιστο πιθανό, καθόλου πιθανό ή με ελαφρά διαφοροποίηση χαρακτηρισμών: συμφωνώ απόλυτα, συμφωνώ πολύ, συμφωνώ αρκετά, συμφωνώ λίγο, δε συμφωνώ καθόλου. Πηγή από: <http://www.greek-language.gr/certification/research/lexicon/show.html?id=118>

Για να επιτευχθεί η ανάλυση ενός συνόλου δεδομένων είναι απαραίτητη η παρουσίαση και η σύνοψη των πληροφοριών του δείγματος για τις μεταβλητές που περιλαμβάνονται σε αυτό χρησιμοποιώντας τις μεθόδους της περιγραφικής στατιστικής (descriptive statistics).⁴⁸

Οι μέθοδοι της περιγραφικής στατιστικής που έχουν αναπτυχθεί για τη συνοπτική και αποτελεσματική παρουσίαση των δεδομένων είναι οι πινακοποίηση και η γραφική αναπαράσταση των δεδομένων. Στην παρούσα ερευνητική μελέτη η επεξεργασία των δεδομένων ολοκληρώνεται με την ανάλυση διασταύρωσης (crosstabulation). Η αποτύπωση, η εξαγωγή και η ανάλυση των δεδομένων υλοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού στατιστικής ανάλυσης της IBM το SPSS statistics.

6.5.1 Έλεγχος αξιοπιστίας (Reliability Analysis)

Προτού εκτελεστεί η περιγραφική στατιστική και η ανάλυση των δεδομένων διενεργήθηκε έλεγχος αξιοπιστίας (reliability analysis). Μια κλίμακα μέτρησης, όπως το ερωτηματολόγιο αποτελείται από ερωτήματα τα οποία ταξινομούνται σε μικρότερες ομάδες βάσει ενός κοινού χαρακτηριστικού.

Η αξιοπιστία εσωτερικής συνάφειας ή συνοχής (internal consistency) των μετρήσεων ενός εργαλείου αναφέρονται στο βαθμό στον οποίο οι ερωτήσεις που μετρούν το ίδιο χαρακτηριστικό παρουσιάζουν υψηλή συνοχή ή συσχέτιση (correlation) τόσο μεταξύ τους όσο και με το χαρακτηριστικό αυτό.

Επομένως, τα ερωτήματα (items) της κλίμακας μέτρησης της παρούσας μελέτης διαχωρίστηκαν σε τρεις ομάδες: «Γνώσεις περί ακτινοφυσικής», «Γνώσεις περί ακτινοπροστασίας», «Εργασιακές πρακτικές σύμφωνα με τους κανονισμούς ακτινοπροστασίας».

⁴⁸Η περιγραφική στατιστική (descriptive statistics) αποτελεί το δεύτερο στόχο του συνόλου των αρχών και μεθοδολογιών της επιστήμης της στατιστικής και ασχολείται με τη συνοπτική και αποτελεσματική παρουσίαση των δεδομένων μιας στατιστικής έρευνας. Τον πρώτο στόχο του συνόλου των αρχών και μεθοδολογιών της επιστήμης της στατιστικής συνιστά ο σχεδιασμός της διαδικασίας συλλογής δεδομένων και καλείται σχεδιασμός πειραμάτων (experimental design). Τέλος, ο τρίτος στόχος του συνόλου των αρχών και μεθοδολογιών της επιστήμης της στατιστικής είναι η επαγωγική στατιστική ή στατιστική συμπερασματολογία (inferential statistics) και αφορά την ανάλυση και εξαγωγή αντίστοιχων συμπερασμάτων.

Πηγή από: <https://www.aua.gr/gpapadopoulos/files/perigrafiki08.pdf>

Ακολούθως, εφαρμόστηκε έλεγχος αξιοπιστίας (reliability analysis) με τον πιο διαδεδομένο δείκτη αξιοπιστίας τον Cronbach's α (alpha) ή δείκτη εσωτερικής συνάφειας ή συνοχής (internal consistency coefficient) που υπολογίστηκε από τον Cronbach Lee το 1951. Οι δείκτες αξιοπιστίας παρέχουν μία εκτίμηση του ποσοστού της κοινής διακύμανσης μεταξύ του παρατηρούμενου και του πραγματικού σκορ και αξιολογούν τη συσχέτιση μεταξύ των μερών (items) μιας δοκιμασίας. Σε κάθε άτομο αντιστοιχεί ένα πραγματικό σκορ για κάθε χαρακτηριστικό. Αυτό θα ήταν το σκορ που θα είχε κανείς αν απαντούσε σε όλα τα πιθανά ερωτήματα που θα μπορούσαν να καλύψουν τη μέτρηση του υπό μελέτη χαρακτηριστικού.

Το παρατηρούμενο σκορ που λαμβάνεται όταν ένα άτομο συμπληρώνει μία κλίμακα μέτρησης (ερωτηματολόγιο) του χαρακτηριστικού απέχει από το πραγματικό του σκορ εξαιτίας του τυχαίου σφάλματος μέτρησης (random error) που προκύπτει επειδή ακριβώς χρησιμοποιήσαμε ένα μέρος μόνο όλων των πιθανών items που θα μπορούσαν να υπάρχουν για να μετρήσουμε με απόλυτη ακρίβεια το χαρακτηριστικό. Άρα: παρατηρούμενο σκορ = πραγματικό σκορ + σφάλμα μέτρησης. Το πραγματικό σκορ δε δύναται να υπολογιστεί, αλλά μπορεί να εκτιμηθεί το σφάλμα μέτρησης με βάση τις συσχετίσεις μεταξύ των items.

Ο δείκτης αξιοπιστίας Cronbach's α μπορεί θεωρητικά να κυμαίνεται από το $-$ άπειρο ως το 1, ωστόσο μόνο οι θετικές τιμές έχουν νόημα. Ενδεικτικές τιμές αξιοπιστίας αποτελούν: το 0,6 (το ελάχιστο αποδεκτό όριο), το 0,7 (επαρκές αλλά όχι καλό), το 0,8 (καλύτερο) και το 0,95 (πολύ υψηλή αξιοπιστία). Εξ' ορισμού ο δείκτης αξιοπιστίας ανεβαίνει όσο αυξάνεται η συσχέτιση μεταξύ των items.

Τα αποτελέσματα από τον έλεγχο αξιοπιστίας είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά. Συγκεκριμένα, η ανάλυση έδειξε ότι για τους παράγοντες γνώσεις περί ακτινοφυσικής με 5 items (group A: A1,A2,A3,A4,A5), γνώσεις περί ακτινοπροστασίας με 7 items (group B: B1,B2,B3,B4,B5,B6,B7), και εργασιακές πρακτικές σύμφωνα με τους κανονισμούς ακτινοπροστασίας με 3 items (group C: C1,C2,C3) ο συντελεστής Cronbach's α είναι 0,691, 0,704 και 0,722 αντίστοιχα, όπως απεικονίζεται και στους πίνακες Π.Α.1, Π.Α.2 και Π.Α.3. «Όπως υποστηρίζει ο Cronbach (1951) για τους παράγοντες που έχουν χαμηλό δείκτη αξιοπιστίας, ο δείκτης μπορεί να επηρεάζεται από το μικρό αριθμό των ερωτήσεων που περιλαμβάνονται στον παράγοντα». Ο πρώτος παράγοντας που αφορά τις γνώσεις περί ακτινοφυσικής παρουσιάζει το χαμηλότερο δείκτη αξιοπιστίας, γεγονός που επιστά προσοχή και προσπάθεια βελτίωσής του σε περίπτωση μελλοντικής χρήσης.

6.5.2 Παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων της έρευνας

Οι μεταβλητές διακρίνονται σε ποσοτικές και ποιοτικές. Οι ποσοτικές μεταβλητές είναι αυτές που μπορούν να μετρηθούν, δηλαδή έχουν αριθμητικές τιμές, όπως η ηλικία, το βάρος και το ύψος. Οι ποιοτικές μεταβλητές είναι εκείνες που περιγράφουν τα χαρακτηριστικά του πληθυσμού που μεταβάλλονται κατά ποιότητα ή είδος αλλά όχι κατά μέγεθος. Τέτοιες μεταβλητές είναι το φύλο, το μορφωτικό επίπεδο και το αντικείμενο εργασίας. Οι ποιοτικές μεταβλητές με τη σειρά τους διαχωρίζονται σε ονομαστικές και σε διατάξιμες, οι οποίες είναι εκείνες που παρέχουν τη δυνατότητα διάταξης.

Τα δεδομένα της έρευνας καταχωρήθηκαν στο λογισμικό στατιστικής ανάλυσης της IBM το SPSS statistics κωδικοποιημένα. Για παράδειγμα, οι απαντήσεις της ποιοτικής μεταβλητής «φύλο» κωδικοποιήθηκαν με τον αριθμό 1 για Άρρεν και 2 για Θήλυ. Οι τιμές των ποσοτικών μεταβλητών ηλικία και προϋπηρεσία ομαδοποιήθηκαν σε κατηγορίες, δηλαδή οι απαντήσεις της μεταβλητής «ηλικία» κωδικοποιήθηκαν με την αριθμητική τιμή 1 για το ηλικιακό γκρουπ 25-35, με το 2 για το 36-45, με το 3 για το 46-55 και με το 4 για το 56-67. Τα δεδομένα που προέκυψαν από τα ερωτήματα περί ακτινοφυσικής, ακτινοπροστασίας και εργασιακών πρακτικών καταχωρήθηκαν στο SPSS με τις αριθμητικές τιμές 1, 2, 3, 4 και 5 για την απάντηση σίγουρα, πολύ πιθανό, αρκετά πιθανό, ελάχιστα πιθανό και καθόλου πιθανό αντίστοιχα.

Το μέγεθος του δείγματος είναι N=52. Το 57,7% εξ' αυτού αντιπροσωπεύει το γυναικείο φύλο και το 42,3% το αντρικό βάση της στήλης των Σχετικών Συχνοτήτων (Percent) του πίνακα Π.Α.4 (Γράφημα Π.Β.1). Το ποσοστό στη στήλη Percent υπολογίζεται στο σύνολο του δείγματος συμπεριλαμβανομένου και των πιθανών ελλিপών τιμών. Αντιθέτως, το ποσοστό στη στήλη Valid Percent εκτιμάται στο σύνολο αυτών που έχουν απαντήσει. Όταν το Valid Percent είναι ίσο με το Percent, όπως συμβαίνει εδώ, σημαίνει ότι δεν υπάρχουν ελλειπείς παρατηρήσεις. Από τη στήλη των Συχνοτήτων (Frequency) προκύπτει ότι από τους 52 ερωτηθέντες οι 30 είναι γυναίκες και οι 22 είναι άντρες.

Η ηλικία των αποκρινόμενων βάση της στήλης των Σχετικών Συχνοτήτων του πίνακα Π.Α.5 (Γράφημα Π.Β.2) είναι 19,2% για το ηλικιακό γκρουπ 25-35, 34,6% για 36-45, 23,1% για 46-55 και 23,1% για 56-67 αντίστοιχα.

Από τη στήλη των Συχνοτήτων πληροφορούμαστε ότι 10 άτομα ανήκουν στο ηλικιακό γκρουπ των 25-35, 18 στο 36-45, 12 στο 46-55 και 12 στο 56-67. Παρατηρούμε ότι τα ηλικιακά γκρουπ είναι περίπου ισάριθμα αναφορικά με τα άτομα.

Επιπλέον, από τη στήλη των Αθροιστικών Σχετικών Συχνοτήτων (Cumulative Percent) εκτιμάται ότι 76,9% των ερωτηθέντων είναι ηλικίας μικρότερης ή ίσης των 55 ετών. Η στήλη αυτή έχει νόημα μόνο για διατάξιμες ποιοτικές μεταβλητές, όπως η συγκεκριμένη που μελετάμε.

Όσον αφορά το μορφωτικό επίπεδο του προσωπικού των εργαστηρίων Πυρηνικής Ιατρικής που ερωτήθηκε σύμφωνα με τη στήλη των Σχετικών Συχνοτήτων του πίνακα Π.Α.6 (Γράφημα Π.Β.3): το 44,2% είναι απόφοιτοι Τ.Ε.Ι. (Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα), το 28,8% είναι απόφοιτοι Α.Ε.Ι. (Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα), το 13,5% αποφοίτησε από Δ.Ε. (Δευτεροβάθμια Εκπαίδευση), το 7,7% κατέχει μεταπτυχιακό δίπλωμα, το 3,8% κατέχει διδακτορικό δίπλωμα και το 1,9% είναι απόφοιτοι Λυκείου.

Στα Τ.Ε.Ι βάσει της στήλης των συχνοτήτων ανήκουν 23 άτομα, στα Α.Ε.Ι αντιστοιχούν 15 και στις σχολές Δ.Ε. 7 άτομα. Μεταπτυχιακό δίπλωμα κατέχουν 4 επαγγελματίες υγείας και διδακτορικό 2 εκ των ερωτηθέντων, ενώ στους αποφοίτους Λυκείου εντάσσεται μόλις 1 άτομο.

Η προϋπηρεσία των εργαζομένων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθότι όπως προκύπτει από τη στήλη των Σχετικών Συχνοτήτων του πίνακα Π.Α.7 (Γράφημα Π.Β.4), ένα ποσοστό της τάξεως του 26,9% μετρά 0-10 χρόνια εμπειρίας και ένα ίδιο ακριβώς ποσοστό διαθέτει 31-40 έτη εμπειρίας. Ενδιάμεσα, το 21,2% των ερωτηθέντων έχει 11-20 έτη προϋπηρεσίας στο βιογραφικό του και το 25% εργάζεται 21-30 χρόνια. Βάσει της στήλης των συχνοτήτων 14 άτομα διαθέτουν τη μικρότερη προϋπηρεσία (0-10) στα τμήματα Πυρηνικής Ιατρικής όπου διεξήχθη η έρευνα και άλλα 14 άτομα έχουν τα περισσότερα χρόνια εμπειρίας (31-40). Οι εργαζόμενοι με 11-20 έτη προϋπηρεσίας απαριθμούνται στους 11 και με 21-30 στους 13. Τέλος, από τη στήλη των Αθροιστικών Σχετικών Συχνοτήτων αποτιμάται πως το 73,1% των ερωτηθέντων έχει αποκτήσει εργασιακή εμπειρία μικρότερη ή ίση των 30 ετών.

Οι κατηγορίες των λειτουργιών υγείας των εργαστηρίων Πυρηνικής Ιατρικής των νοσοκομείων Π.Γ.Ν.Α. Αλεξάνδρα και Ν.Ι.Μ.Τ.Σ διακρίνονται στο ιατρικό, παραϊατρικό, νοσηλευτικό και διοικητικό προσωπικό.

Ειδικότερα, το ιατρικό προσωπικό σύμφωνα με τη στήλη των Συχνοτήτων και τη στήλη των Σχετικών Συχνοτήτων του πίνακα Π.Α.8 (Γράφημα Π.Β.5) απαρτίζεται από 16 άτομα με ποσοστό 30,8% στο σύνολο των ερωτούμενων, ενώ στο νοσηλευτικό προσωπικό ανήκουν 4 εργαζόμενοι των εργαστηρίων με ποσοστό 7,7%.

Το μεγαλύτερο μέρος των ερωτηθέντων αποτελεί το παραϊατρικό προσωπικό με ποσοστό 55,8% και συχνότητα 29 άτομα. Από την άλλη μεριά, το διοικητικό προσωπικό καταλαμβάνει μόνο το 5,8% των υπό έρευνα τμημάτων της Πυρηνικής Ιατρικής που αντιστοιχεί σε 3 εργαζομένους. Στα εργαστήρια Πυρηνικής Ιατρικής πραγματοποιούνται ιατρικές διαγνωστικές ή θεραπευτικές εξετάσεις γι' αυτό καθίσταται αναγκαία η έντονη παρουσία των πυρηνικών ιατρών και των τεχνολόγων ακτινολόγων προκειμένου αυτές να διεκπεραιωθούν. Ο αριθμός των νοσηλευτών είναι επαρκής για να καλυφθούν οι ανάγκες των προαναφερθέντων τμημάτων, όπως και αυτός του διοικητικού προσωπικού που επιτελεί τη γραμματειακή υποστήριξη.

Τα ερωτήματα που απαρτίζουν το ερωτηματολόγιο ταξινομούνται σε ενότητες βάσει τριών αξόνων:

- το θεωρητικό υπόβαθρο των επαγγελματιών υγείας περί ακτινοφυσικής
- το θεωρητικό υπόβαθρο των λειτουργών υγείας περί ακτινοπροστασίας και
- το επίπεδο των γνώσεων που αφορούν τις εργασιακές πρακτικές σύμφωνα με τους κανονισμούς ακτινοπροστασίας.

Στο πρώτο ερώτημα του ερωτηματολογίου οι εργαζόμενοι καλούνται να απαντήσουν το εξής: «Οι ιοντίζουσες ακτινοβολίες, κατά την άποψή σας, είναι επιβλαβείς για την υγεία του ανθρώπου». Η πλειονότητα των ερωτηθέντων με ποσοστό 69,2% (πίνακας Π.Α.9, γράφημα Π.Β.6) απάντησε με βεβαιότητα ότι οι ιοντίζουσες ακτινοβολίες επιφέρουν βλαπτικές επιδράσεις στην υγεία του ανθρώπου. Εν τούτοις, το ποσοστό 17,3% που αντιστοιχεί στην απάντηση πολύ πιθανό, το ποσοστό 9,6% του αρκετά πιθανό και αυτό της τάξεως του 3,8% του ελάχιστα πιθανό αποδεικνύουν πως υπάρχει ελλιπής ενημέρωση ενός ικανού αριθμού εργαζομένων σε σχέση με τις επιβλαβείς συνέπειες των ιονιζουσών ακτινοβολιών.

Στο δεύτερο ερώτημα «Τα είδη της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας διαχωρίζονται σε ιοντίζουσα και μη ιοντίζουσα» το μεγαλύτερο μέρος του προσωπικού (Σίγουρα με ποσοστό 67,3%, πίνακας Π.Α.10, γράφημα Π.Β.7) αποφάνθηκε με βεβαιότητα ότι υφίσταται η διάκριση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε σχέση με τα είδη της.

Ο ιονισμός συνιστά ένα από τα κριτήρια ταξινόμησης των ειδών των ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών. Εν τούτοις, ένα σημαντικό ποσοστό του προσωπικού (Πολύ πιθανό με 25% και αρκετά πιθανό 7,7%) εξακολουθεί να μη γνωρίζει επαρκώς τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών.

Στην τρίτη ερώτηση «Η ακτινοβολία X προκαλεί ιονισμό της ύλης» το 59,6% λειτουργών υγείας (Σίγουρα-59,6%, πίνακας Π.Α.11, γράφημα Π.Β.8) γνωρίζει με βεβαιότητα τη βασική ιδιότητα των ακτίνων X κατά την αλληλεπίδρασή τους με την ύλη. Αντιθέτως, τα ποσοστά που ακολουθούν 26,9%, 11,5% και 1,9% για τις απαντήσεις πολύ πιθανό, αρκετά πιθανό και ελάχιστα πιθανό αντίστοιχα σημαίνουν ότι υφίσταται ανεπάρκεια γνώσεων του προσωπικού των εργαστηρίων σε θέματα ακτινοφυσικής.

Στο τέταρτο ερώτημα του ερωτηματολογίου «Η ακτινοβολία γ χαρακτηρίζεται από μεγάλη διεισδυτικότητα» η πλειοψηφία των ερωτηθέντων με ποσοστό 69,2% όπως προκύπτει από τη στήλη των Συχνοτήτων του πίνακα Π.Α.12 (γράφημα Π.Β.9), υποστηρίζει με σιγουριά ότι η ακτινοβολία γ διακρίνεται για τη μεγάλη διεισδυτικότητά της. Τουναντίον, το υπόλοιπο μέρος των εργαζομένων απάντησε «πολύ πιθανό» σε ποσοστό 25% και «αρκετά πιθανό» σε ποσοστό 5,8%. Τα προαναφερθέντα αποτελέσματα αποδεικνύουν πως ένα τμήμα του συνόλου του προσωπικού των εργαστηρίων Πυρηνικής Ιατρικής των νοσοκομείων Π.Γ.Ν.Α. Αλεξάνδρα και Ν.Ι.Μ.Τ.Σ δεν είναι επαρκώς ενημερωμένο σε θέματα αφορούν τη φυσική των ακτινοβολιών.

Στην πέμπτη ερώτηση «Ο χρόνος ημιζωής είναι ο χρόνος που απαιτείται ώστε ο αριθμός των ραδιενεργών πυρήνων να μειωθεί στο μισό του αρχικού τους αριθμού» ένα σημαντικό ποσοστό της τάξεως του 59,6% (πίνακας Π.Α.13, γράφημα Π.Β.10) διακρίνεται από την πεποίθηση ότι ο χρόνος ημιζωής είναι ο απαιτούμενος χρόνος για τη μείωση του αριθμού των ραδιενεργών πυρήνων στο μισό του αρχικού τους αριθμού. Από την άλλη πλευρά, οι υπόλοιποι ερωτούμενοι δε δηλώνουν με βεβαιότητα ότι ισχύει αυτή η πρόταση σε ποσοστό 32,7%, 5,8% και 1,9% που αντιστοιχούν στις απαντήσεις πολύ πιθανό, αρκετά πιθανό και ελάχιστα πιθανό. Επομένως, παρατηρείται ελλιπής ενημέρωση των εργαζομένων των τμημάτων σε ζητήματα ακτινοφυσικής.

Στην έκτη ερώτηση «Ο χρόνος, η απόσταση και η θωράκιση αποτελούν τα βασικά μέτρα ακτινοπροστασίας» η πλειονότητα του προσωπικού των τμημάτων αποκρίνεται με

σιγουριά σε ποσοστό 59,6% (πίνακας Π.Α.14, γράφημα Π.Β.11), επομένως γνωρίζει το τρίπτυχο της ακτινοπροστασίας για το χρόνο, την απόσταση και τη θωράκιση.

Με βάση τις απαντήσεις του υπόλοιπου μέρους των ερωτηθέντων με ποσοστά 26,9% για το «πολύ πιθανό» και 13,5% για το «αρκετά πιθανό», διαπιστώνεται ανεπάρκεια γνώσεων για το ζήτημα αυτό που αφορά τις εργασιακές πρακτικές σύμφωνα με τους κανονισμούς της ακτινοπροστασίας και είναι μείζονος σημασίας για την ακτινοπροστασία σε καθημερινή βάση.

Στο έβδομο ερώτημα «Το ετήσιο όριο της ενεργού δόσης για τους επαγγελματικά εκτεθειμένους είναι 20mSv» το μεγαλύτερο τμήμα των εργαζομένων είναι βέβαιο σε ποσοστό 67,3% (πίνακας Π.Α.15, γράφημα Π.Β.12) για το ετήσιο όριο της ενεργού δόσης που τους αφορά και καθορίζεται από την ΕΕΑΕ στα 20mSv. Αντιθέτως, το λοιπό τμήμα του προσωπικού δεν εμφανίζεται σίγουρο για το καθορισμένο ετήσιο όριο της ενεργού δόσης απαντώντας με πολύ πιθανό σε ποσοστό 19,2% και αρκετά πιθανό σε ποσοστό 13,5%. Τούτο σημαίνει έλλειψη ενημέρωσης μέρους των εργαζομένων σχετικά με ζητήματα ακτινοπροστασίας.

Στο όγδοο ερώτημα «Τα βασικά μέτρα ακτινοπροστασίας στα εργαστήρια Πυρηνικής Ιατρικής είναι η χρήση της απλής ιατρικής ποδιάς, τα γάντια μιας χρήσης και το προσωπικό δοσίμετρο» το μεγαλύτερο τμήμα από το σύνολο του προσωπικού δηλώνει βέβαιο με ποσοστό 69,2% (πίνακας Π.Α.16, γράφημα Π.Β.13) για τα βασικά μέτρα ακτινοπροστασίας στις καθημερινές πρακτικές. Τουναντίον, το υπόλοιπο τμήμα του προσωπικού δεν εμφανίζεται σίγουρο για τα βασικά μέτρα ακτινοπροστασίας με ποσοστά 17,3%, 7,7%, 1,9% και 3,8% να απαντούν με πολύ πιθανό, αρκετά πιθανό, ελάχιστα πιθανό και καθόλου πιθανό αντιστοίχως.

Η γνώση των βασικών μέτρων ακτινοπροστασίας κατά τις εργασιακές πρακτικές, τα οποία καθορίζονται από τους κανονισμούς ακτινοπροστασίας, είναι ζωτικής σημασίας για την ακτινοπροστασία των λειτουργών υγείας σε καθημερινή βάση. Η ανεπάρκεια αυτής της γνώσης από ένα μέρος του προσωπικού που αποδεικνύεται βάσει των αποτελεσμάτων μπορεί να οφείλεται σε ελλιπή ενημέρωση ή σε σύγχυση.

Υπάρχει περίπτωση κάποιοι επαγγελματίες υγείας να συγχέονται όσον αφορά τη χρήση της απλής ιατρικής ποδιάς και να θεωρούν ότι είναι ιδανικότερη για την ακτινοπροστασία τους η χρήση της μολύβδινης ποδιάς.

Ωστόσο όπως έχει προαναφερθεί, η χρήση της μολύβδινης ακτινολογικής ποδιάς σε συνήθειες πρακτικές στα εργαστήρια Πυρηνικής Ιατρικής δε συμβάλλει στη μείωση της

δόσης διότι το πάχος της είναι κατάλληλο για ακτινοβολίες πολύ χαμηλότερης ενέργειας σε σύγκριση με εκείνες που χρησιμοποιούνται εκεί. Επιπροσθέτως, το βάρος της μολύβδινης ακτινολογικής ποδιάς προξενεί κόπωση και δυσχεραίνει την κίνηση και γι' αυτό το λόγω είναι επίφοβη για λάθη και ατυχήματα κατά την εργασία. Για τους παραπάνω λόγους στα εργαστήρια Πυρηνικής Ιατρικής συνίσταται η χρήση της απλής ιατρικής ποδιάς και όχι της μολύβδινης ακτινολογικής ποδιάς.

Στην ένατη ερώτηση «Η πιστή τήρηση των οδηγιών ακτινοπροστασίας και η ορθή χρήση του ειδικού εξοπλισμού είναι προσωπική ευθύνη του εργαζόμενου και καθιστά την εργασία με τα ραδιοϊσότοπα ασφαλή» η συντριπτική πλειοψηφία των εργαζομένων με ποσοστό 82,7% (πίνακας Π.Α.17, γράφημα Π.Β.14) αξιολογεί ότι η πιστή τήρηση των οδηγιών ακτινοπροστασίας και η ορθή χρήση του ειδικού εξοπλισμού αποτελούν προσωπική ευθύνη τους και ότι αυτές εξασφαλίζουν την προστασία τους από τις ιονίζουσες ακτινοβολίες που εκπέμπουν τα ραδιοϊσότοπα.

Εν τούτοις, ένα μικρό ποσοστό της τάξεως του 17,3% δεν εμφανίζεται βέβαιο απαντώντας με «πολύ πιθανό». Η αβεβαιότητα του μικρού αυτού μέρους του προσωπικού μπορεί να οφείλεται είτε στην ελλιπή πληροφόρησή του στα ζητήματα των εργασιακών πρακτικών σύμφωνα με τους κανονισμούς ακτινοπροστασίας ή στην αμφιβολία του για την επάρκεια των οδηγιών ακτινοπροστασίας και του ακτινοπροστατευτικού εξοπλισμού που εξασφαλίζουν την ακτινοπροστασία του.

Στο δέκατο ερώτημα «Οι ελεγχόμενες περιοχές είναι εκείνες στις οποίες ισχύουν ειδικοί κανόνες ακτινοπροστασίας από ιοντίζουσες ακτινοβολίες και παρεμπόδισης της εξάπλωσης ραδιενεργού μόλυνσης» ένα σημαντικό μέρος του συνόλου των ερωτηθέντων με ποσοστό 63,5% (πίνακας Π.Α.18, γράφημα Π.Β.15) διακρίνεται από την πεποίθηση πως στις ελεγχόμενες περιοχές ισχύουν ειδικοί κανόνες ακτινοπροστασίας και παρεμπόδισης της εξάπλωσης ραδιενεργού μόλυνσης καθότι σε αυτές ενδέχεται να γίνει υπέρβαση των 6 mSv κατά τη διάρκεια ενός έτους.

Το συγκεκριμένο ερώτημα διερευνά τη γνώση των εργαζομένων για τη σημασία του διαχωρισμού των χώρων εργασίας σε ζώνες, τις επιβλεπόμενες και τις ελεγχόμενες περιοχές, ο οποίος είναι μείζονος σημασίας για την ακτινοπροστασία τους.

Ωστόσο, τα ποσοστά 21,2%, 11,5% και 3,8% που αντιστοιχούν στις απαντήσεις πολύ πιθανό, αρκετά πιθανό και ελάχιστα πιθανό των υπόλοιπων ερωτηθέντων πιστοποιούν την ανεπάρκεια της πληροφόρησής τους σε ζητήματα ακτινοπροστασίας.

Στην εντεκάτη ερώτηση «Η έννοια του ορίου δόσεων είναι τα ανώτερα όρια δόσεων που έχουν το μικρότερο δυνατό κίνδυνο» η πλειονότητα του προσωπικού με ποσοστό 69,2% (πίνακας Π.Α.19, γράφημα Π.Β.16) υποστηρίζει με βεβαιότητα πως το όριο των δόσεων καθορίζεται με βάση τα ανώτερα όρια δόσεων που εγκυμονούν το μικρότερο δυνατό κίνδυνο. Αντιθέτως, το υπόλοιπο τμήμα του προσωπικού απαντά με πολύ πιθανό, αρκετά πιθανό, ελάχιστα πιθανό και καθόλου πιθανό σε ποσοστά 19,2%, 5,8%, 3,8% και 1,9% αντίστοιχα. Στηριζόμενοι στα αποτελέσματα συνάγεται το συμπέρασμα ότι ένα μέρος των εργαζομένων παρουσιάζει ελλιπή ενημέρωση στα θέματα ακτινοπροστασίας.

Στο δωδέκατο ερώτημα «Οι βιολογικές επιδράσεις της ακτινοβολίας εξαρτώνται από την απορροφούμενη δόση, την ποιότητα της ακτινοβολίας (ακτίνες X, ακτίνες γ, σωμάτια α, σωμάτια β, νετρόνια) και την ακτινοευαισθησία των ιστών και των οργάνων» η συντριπτική πλειοψηφία των εργαζομένων με ποσοστό 80,8% (πίνακας Π.Α.20, γράφημα Π.Β.17) εμφανίζεται σίγουρη για τους παράγοντες που επηρεάζουν τις βιολογικές επιδράσεις της ιοντίζουσας ακτινοβολίας που είναι η απορροφούμενη δόση, η ποιότητα της ακτινοβολίας (ακτίνες X, ακτίνες γ, σωμάτια α, σωμάτια β, νετρόνια) και η ακτινοευαισθησία των ιστών και των οργάνων.

Από την άλλη πλευρά, τα ποσοστά 11,5%, 3,8% και 3,8% για τις απαντήσεις πολύ πιθανό, αρκετά πιθανό και ελάχιστα πιθανό αντίστοιχα που αντιπροσωπεύουν τους υπόλοιπους εργαζόμενους οδηγούν στο συμπέρασμα της ανεπάρκειας γνώσεων στα ζητήματα ακτινοπροστασίας.

Στην ερώτηση δεκατρία «Η μοναδική αιτία ραδιενέργειας είναι η αστάθεια των πυρήνων» τα μισά άτομα περίπου του προσωπικού με ποσοστό 57,7% (πίνακας Π.Α.21, γράφημα Π.Β.18) έχουν σαφή εικόνα για την αιτία δημιουργίας της ραδιενέργειας καθώς τα ραδιενεργά στοιχεία εκπέμπουν ακτινοβολία και καταλήγουν σε ένα σταθερό στοιχείο. Το φαινόμενο σταματά όταν προκύψει σταθερός πυρήνας. Τουναντίον, το άλλο μισό περίπου του προσωπικού όπως προκύπτει από τη στήλη των Σχετικών Συχνοτήτων του πίνακα Π.Α.21 απαντά πολύ πιθανό, αρκετά πιθανό, ελάχιστα πιθανό και καθόλου πιθανό σε ποσοστά 25%, 11,5%, 3,8% και 1,9% αντίστοιχως.

Από τα αποτελέσματα διαπιστώνεται πως το μισό περίπου μέρος των εργαζομένων έχει ελλιπείς γνώσεις σε θέματα ακτινοπροστασίας.

Στο ερώτημα δεκατέσσερα «Ο όρος «δόση» αναφέρεται στην ενέργεια που απορροφά το σώμα του εξεταζόμενου λόγω της εσωτερικής ακτινοβόλησης από το ραδιοϊσότοπο που του χορηγήθηκε» η πλειονότητα των ερωτηθέντων με υψηλό ποσοστό της τάξεως του 71,2% (πίνακας Π.Α.22, γράφημα Π.Β.19) γνωρίζει με βεβαιότητα τον ορισμό της δόσης. Ωστόσο, το υπόλοιπο τμήμα των ερωτηθέντων όπως αποδεικνύεται από τα αποτελέσματα της στήλης των Σχετικών Συχνοτήτων του πίνακα Π.Α.22 δεν είναι σίγουρο για τον ορισμό της δόσης καθώς απαντά με ποσοστά 15,4%, 7,7% και 5,8% που αντιστοιχούν στις απαντήσεις πολύ πιθανό, αρκετά πιθανό και ελάχιστα πιθανό. Άρα, ένα μικρό μέρος των εργαζομένων δε διαθέτει επαρκείς γνώσεις σε ζητήματα ακτινοπροστασίας.

Τέλος, στην ερώτηση δεκαπέντε «Ο μετρητής Geiger-Müller είναι ένα όργανο για την ανίχνευση και τη μέτρηση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας» καταγράφεται το υψηλότερο ποσοστό της τάξεως του 84,6% (πίνακας Π.Α.23, γράφημα Π.Β.20) σε απάντηση του ερωτηματολογίου που υποδηλώνει ότι η πλειοψηφία του προσωπικού είναι σίγουρη πως ο μετρητής Geiger-Müller συνιστά ένα όργανο για την ανίχνευση και τη μέτρηση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας. Αντιθέτως, ένα μικρό ποσοστό της τάξεως του 15,4% εμφανίζεται αβέβαιο απαντώντας με «πολύ πιθανό». Ως εκ τούτου, στηριζόμενοι στα αποτελέσματα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ένα μικρό μέρος του προσωπικού διαθέτει ελλιπή πληροφόρηση σε θέματα ακτινοπροστασίας.

6.5.3. Ανάλυση διασταύρωσης (crosstabulation)

Η εύρεση της πιθανής σχέσης μεταξύ δύο ποιοτικών μεταβλητών επιτυγχάνεται μέσω της δημιουργίας του πίνακα συνάφειας ή πίνακα διπλής εισόδου (crosstabulation or contingency table) που είναι δισδιάστατος με r γραμμές όσες οι κατηγορίες της μιας ποιοτικής μεταβλητής και c στήλες όσες οι κατηγορίες της άλλης ποιοτικής μεταβλητής. Ως εκ τούτου, προκύπτουν $r \times c$ κελιά (κυψελίδες). Κάθε κελί παριστάνει ένα συνδυασμό των τιμών των δύο μεταβλητών και καταγράφονται σε αυτά οι παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισής τους.

Ο έλεγχος της ύπαρξης ή μη ανεξαρτησίας μεταξύ δύο ποιοτικών μεταβλητών πραγματοποιείται με το χ^2 στατιστικό τεστ. Οι μεγάλες αποκλίσεις των αναμενόμενων τιμών (expected counts) από τις παρατηρούμενες τιμές (observed counts) υποδηλώνει πιθανή ύπαρξη σχέσης εξάρτησης μεταξύ δύο ποιοτικών μεταβλητών. Η υπόθεση ανεξαρτησίας απορρίπτεται σε επίπεδο σημαντικότητας α , όταν p -τιμή $< \alpha$.

Σε περίπτωση που απορριφθεί η υπόθεση ανεξαρτησίας προκειμένου να διαπιστωθεί ποια κελιά δημιουργούν την εξάρτηση, πρέπει να παρατηρήσουμε τις τιμές των Adjusted Residuals που ακολουθούν κατά προσέγγιση κανονική κατανομή εφόσον οι μεταβλητές του πίνακα συνάφειας είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Οι τιμές των Adjusted Residuals που είναι μεγαλύτερες κατά απόλυτη τιμή από 1,96 (για επίπεδο σημαντικότητας 5%) υποδεικνύουν κελιά που διαφέρουν από το μοντέλο ανεξαρτησίας. Ο συντελεστής Pearson (Phi) συνιστά ένα στατιστικό μέτρο, η μέγιστη τιμή του οποίου εξαρτάται από το μέγεθος του πίνακα με την τιμή 0 να υποδηλώνει ανεξαρτησία των μεταβλητών.

Ακολουθεί η μελέτη της σχέσης μεταξύ των ποιοτικών μεταβλητών «φύλο» και «γνώσης περί εργασιακών πρακτικών σύμφωνα με τους κανονισμούς ακτινοπροστασίας». Η γνώση περί εργασιακών πρακτικών σύμφωνα με τους κανονισμούς ακτινοπροστασίας διερευνάται με την ερώτηση: «Η πιστή τήρηση των οδηγιών ακτινοπροστασίας και η ορθή χρήση του ειδικού εξοπλισμού είναι προσωπική ευθύνη του εργαζόμενου και καθιστά την εργασία με τα ραδιοϊσότοπα ασφαλή».

Στον πίνακα συνάφειας Π.Α.24 παρατηρούμε ότι οι αναμενόμενες συχνότητες (Expected Count) είναι κοντά στις παρατηρούμενες συχνότητες (Count). Επιπρόσθετα, από τον πίνακα προκύπτει ότι αμφότεροι άντρες και γυναίκες σε ποσοστό 81,8% και 83,3% αντίστοιχα είναι σίγουροι ότι η πιστή τήρηση των οδηγιών ακτινοπροστασίας και η ορθή χρήση του ειδικού εξοπλισμού αποτελούν προσωπική ευθύνη τους και εξασφαλίζουν την προστασία τους από τις ιονίζουσες ακτινοβολίες που εκπέμπουν τα ραδιοϊσότοπα. Αντιθέτως, ένα μικρό μέρος του αντρικού και του γυναικείου φύλου με την απάντηση «πολύ πιθανό» σε ποσοστά 18,2% και 16,7% αντιστοίχως, αποδεικνύουν ότι δε διαθέτουν επαρκείς γνώσεις σε θέματα εργασιακών πρακτικών σύμφωνα με τους κανονισμούς ακτινοπροστασίας. Επιπλέον, καμία από τις τιμές των Adjusted Residuals δεν είναι μεγαλύτερη κατά απόλυτη τιμή από 1,96.

Στους πίνακες με δύο γραμμές και δύο στήλες όπως ο συγκεκριμένος που εξετάζουμε δύο ποιοτικές μεταβλητές με δύο δυνατές τιμές η καθεμία με το Chi-square υπολογίζεται το X^2 του Pearson, το τεστ πηλίκου πιθανοφανειών (the likelihood-ratio) και το Fisher's exact test. Το Fisher's exact test είναι ένας έλεγχος χρήσιμος για περιπτώσεις όπου δεν ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις του X^2 τεστ ανεξαρτησίας που είναι η μη ύπαρξη αναμενόμενων τιμών μικρότερων του 5. Όταν έχουμε πίνακες συνάφειας μεγαλύτερης διάστασης από δύο μεταβλητές με δύο δυνατές τιμές και δεν ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις του X^2 τεστ ανεξαρτησίας, τότε συγχωνεύονται γειτονικά κελιά.

Ο πίνακας Π.Α.25 Chi-square Tests μας ενημερώνει για το αποτέλεσμα του ελέγχου ανεξαρτησίας. Στο κάτω μέρος του πίνακα υπάρχει μια υποσημείωση α η οποία μας πληροφορεί πως ένα κελί που αποτελεί το 25% των συνολικών κελιών, έχει αναμενόμενη συχνότητα μικρότερη του 5. Επομένως, εφόσον ο πίνακας συνάφειας μελετά δύο ποιοτικές μεταβλητές με δύο πιθανές τιμές η καθεμία, θα χρησιμοποιηθεί το Fisher's exact test από το οποίο συμπεραίνουμε ότι η υπόθεση της ανεξαρτησίας του φύλου και της γνώσης περί εργασιακών πρακτικών σύμφωνα με τους κανονισμούς ακτινοπροστασίας δεν μπορεί να απορριφθεί, είναι αποδεκτή καθώς η p -τιμή = 0,585 είναι μεγαλύτερη από το $\alpha = 0,05$. Άρα, το φύλο είναι ανεξάρτητο της γνώσης περί εργασιακών πρακτικών.

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε τη σχέση μεταξύ των ποιοτικών μεταβλητών «φύλο» και «γνώσης περί ακτινοπροστασίας». Η γνώση περί ακτινοπροστασίας διερευνάται με την ερώτηση: «Ο μετρητής Geiger-Müller είναι ένα όργανο για την ανίχνευση και τη μέτρηση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας».

Από τον πίνακα συνάφειας Π.Α.26 προκύπτει ότι οι αναμενόμενες συχνότητες είναι σχεδόν κοντά στις παρατηρούμενες συχνότητες. Επιπλέον, βάσει των αποτελεσμάτων η πλειονότητα των αντρών και των γυναικών με ποσοστά 77,3% και 90% αντιστοίχως δηλώνουν βέβαιοι πως ο μετρητής Geiger-Müller συνιστά ένα όργανο με το οποίο ανιχνεύεται και μετράται η ιοντίζουσα ακτινοβολία. Άρα δεν υφίσταται αξιοσημείωτη διαφοροποίηση ανάμεσα στα δύο φύλα. Τουναντίον, ένα μικρό ποσοστό της τάξεως του 22,7% για τους άντρες και 10% για τις γυναίκες απάντησαν «πολύ πιθανό». Επομένως, διαπιστώνεται ότι ένα μικρό μέρος των ερωτηθέντων έχουν ελλιπή ενημέρωση σε ζητήματα ακτινοπροστασίας. Ακόμη, καμία από τις τιμές των Adjusted Residuals δεν είναι μεγαλύτερη κατά απόλυτη τιμή από 1,96.

Ο πίνακας Π.Α.27 Chi-square Tests μας ενημερώνει για το αποτέλεσμα του ελέγχου ανεξαρτησίας. Στο κάτω μέρος του πίνακα υπάρχει μια υποσημείωση α η οποία μας πληροφορεί ότι δύο κελιά που συνιστούν το 50% των συνολικών κελιών, έχουν αναμενόμενη συχνότητα μικρότερη του 5. Ως εκ τούτου, καθώς ο πίνακας συνάφειας μελετά δύο ποιοτικές μεταβλητές με δύο πιθανές τιμές η καθεμία, θα χρησιμοποιηθεί το Fisher's exact test.

Από το Fisher's exact test προκύπτει ότι η υπόθεση ανεξαρτησίας των μεταβλητών φύλο και γνώσης περί ακτινοπροστασίας γίνεται αποδεκτή, αφού η p-τιμή = 0,192 είναι μεγαλύτερη από το $\alpha = 0,05$. Άρα, το φύλο είναι ανεξάρτητο της γνώσης σε ζητήματα ακτινοπροστασίας.

6.6 Συμπεράσματα και προτάσεις

Βασιζόμενοι στα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ερευνητική μελέτη συμπεραίνουμε ότι το προσωπικό των εργαστηρίων Πυρηνικής Ιατρικής των νοσοκομείων Π.Γ.Ν.Α. Αλεξάνδρα και Ν.Ι.Μ.Τ.Σ έχει αρκετά καλή θεωρητική κατάρτιση σε βασικά θέματα ακτινοφυσικής, ακτινοπροστασίας και εργασιακών πρακτικών όπως υπαγορεύονται από τους κανονισμούς ακτινοπροστασίας. Ωστόσο, ένα αξιοσημείωτο ποσοστό των επαγγελματιών υγείας παρουσιάζει ελλιπή ενημέρωση στα παραπάνω θέματα.

Στις καθημερινές συνήθειες πρακτικές η πλειονότητα των λειτουργών υγείας συμπεριφέρεται βάσει των κανονισμών ακτινοπροστασίας που έχει θεσπίσει η ΕΕΑΕ ενσωματώνοντας τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες της Euratom στο εθνικό δίκαιο. Τουναντίον, ένα μικρό ποσοστό απάντησε αμφίσημα σε ερωτήσεις που αφορούν τις εργασιακές πρακτικές σύμφωνα με τους κανονισμούς ακτινοπροστασίας.

Η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) είναι η αρμόδια αρχή για θέματα ακτινοπροστασίας στη χώρα μας και ο ρόλος της είναι να συντάσσει και να μεριμνά για την εφαρμογή των κανονισμών και να εισηγείται πρόσθετα μέτρα όποτε κρίνει σκόπιμο με στόχο την εξασφάλιση του περιορισμού των ατομικών και συλλογικών δόσεων. Επομένως, θα ήταν επωφελές η ΕΕΑΕ να διεξάγει σεμινάρια και ημερίδες για την εκπαίδευση του προσωπικού. Κατά αυτόν τον τρόπο οι επαγγελματίες υγείας θα αποκτήσουν καλύτερο θεωρητικό υπόβαθρο.

Ακόμα, ωφέλιμο θα ήταν ο υπεύθυνος Ακτινοφυσικός του τμήματος να μεριμνά για την αδιάλειπτη εκπαίδευση του προσωπικού σε θέματα ακτινοφυσικής και ακτινοπροστασίας. Επιπρόσθετα, ο υπεύθυνος Ακτινοφυσικός πρέπει να ελέγχει αν εφαρμόζονται από τους εργαζόμενους οι καθημερινές συνήθειες πρακτικές βάσει των κανονισμών ακτινοπροστασίας. Επιπλέον, θα μπορούσε να υπάρξει αξιολόγηση του προσωπικού που να περιλαμβάνει και αξιολόγηση των γνώσεών του στα προαναφερθέντα ζητήματα με την προϋπόθεση της ύπαρξης αντικειμενικότητας.

Προκειμένου να υπάρξει αντικειμενικότητα στις αξιολογήσεις θα χρειαστεί ενημέρωση σχετικά με τα κριτήρια αξιολόγησης και ο τρόπος αξιολόγησης των εργαζομένων θα πρέπει να είναι ενιαίος στο σύνολο του εκάστοτε τμήματος. Ως εκ τούτου, εφόσον όλοι οι εργαζόμενοι θα γνωρίζουν τα κριτήρια και τους παραμέτρους βάσει των οποίων θα αξιολογούνται, θα μπορούν να βελτιώσουν την απόδοσή τους σε αυτά.

6.7 Ανακεφαλαίωση

Ανακεφαλαιώνοντας, η ακτινοπροστασία είναι ευθύνη αρχικά της ΕΕΑΕ, στη συνέχεια του υπεύθυνου Ακτινοφυσικού αλλά και όλου του προσωπικού που εργάζεται σε εργαστήρια όπου εκτελούνται εξετάσεις με τη χρήση των ιοντιζουσών ακτινοβολιών εφαρμόζοντας τους κανονισμούς ακτινοπροστασίας στις καθημερινές του πρακτικές και λαμβάνοντας τα απαραίτητα ακτινοπροστατευτικά μέτρα. Βαρυσημαντή για την ακτινοπροστασία είναι η διασφάλιση ποιότητας που αφορά το σύνολο των οδηγιών και των συστηματικών ενεργειών που στοχεύουν στη βελτίωση των ιατρικών υπηρεσιών και την οικοδόμηση των αναγκαίων μέτρων για τις υπηρεσίες αυτές.

Σε ένα τμήμα Πυρηνικής Ιατρικής οι ενέργειες αυτές αποσκοπούν στην υλοποίηση της ιατρικής διαγνωστικής εξέτασης ή θεραπείας με το μέγιστο κλινικό αποτέλεσμα και την ελάχιστη δυνατή δόση λαμβάνοντας πάντα υπόψιν την άνεση του εξεταζόμενου και το κόστος της εξέτασης ή της θεραπείας.

Οι ποιοτικοί έλεγχοι των μετρητικών και απεικονιστικών συστημάτων είναι αναγκαίοι για την εκτίμηση, τη βελτίωση και τη σταθερή απόδοσή τους με στόχο το μέγιστο κλινικό αποτέλεσμα και την ακτινοπροστασία του προσωπικού και των ασθενών. Ο Ακτινοφυσικός του εκάστοτε τμήματος είναι υπεύθυνος για την οργάνωση, την εποπτεία και τη διεξαγωγή των ελέγχων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Π.Α.1

Δείκτης αξιοπιστίας Cronbach's α της ομάδας Α

Reability Statistics A

Cronbach's Alpha Based on Standardized		
Cronbach's Alpha	Items	N of Items
.691	.687	5

Π.Α.2

Ανάλυση αξιοπιστίας Cronbach's α της ομάδα Β

Reability Statistics B

Cronbach's Alpha Based on Standardized		
Cronbach's Alpha	Items	N of Items
.704	.714	7

Π.Α.3

Ανάλυση αξιοπιστίας Cronbach's α της ομάδα C

Reliability Statistics C

Cronbach's Alpha Based on Standardized		
Cronbach's Alpha	Items	N of Items
.722	.725	3

Π.Α.4

Παρουσίαση αποτελεσμάτων για το φύλο των ερωτηθέντων

Φύλο

		Frequency	Percent	ValidPercent	CumulativePercent
Valid	Άρρεν	22	42,3	42,3	42,3
	Θήλυ	30	57,7	57,7	100,0
	Total	52	100,0	100,0	

Π.Α.5

Παρουσίαση αποτελεσμάτων για την ηλικία των ερωτηθέντων

Ηλικία

		Frequency	Percent	ValidPercent	CumulativePercent
Valid	25-35	10	19,2	19,2	19,2
	36-45	18	34,6	34,6	53,8
	46-55	12	23,1	23,1	76,9
	56-67	12	23,1	23,1	100,0
	Total	52	100,0	100,0	

Π.Α.6

Παρουσίαση αποτελεσμάτων για το μορφωτικό επίπεδο των ερωτηθέντων

Μορφωτικό επίπεδο

		Frequency	Percent	ValidPercent	CumulativePercent
Valid	Απόφοιτος Λυκείου	1	1,9	1,9	1,9
	Κάτοχος πτυχίου Δ.Ε.	7	13,5	13,5	15,4
	Κάτοχος πτυχίου Α.Ε.Ι.	15	28,8	28,8	44,2
	Κάτοχος πτυχίου Τ.Ε.Ι.	23	44,2	44,2	88,5
	Μεταπτυχιακό δίπλωμα	4	7,7	7,7	96,2
	Διδακτορικό δίπλωμα	2	3,8	3,8	100,0
	Total		52	100,0	100,0

Π.Α.7

Παρουσίαση αποτελεσμάτων για την προϋπηρεσία των ερωτηθέντων

Προϋπηρεσία (σε έτη)

		Frequency	Percent	ValidPercent	Cumulative Percent
Valid	0-10	14	26,9	26,9	26,9
	11-20	11	21,2	21,2	48,1
	21-30	13	25,0	25,0	73,1
	31-40	14	26,9	26,9	100,0
	Total	52	100,0	100,0	

Π.Α.8

Παρουσίαση αποτελεσμάτων για το αντικείμενο εργασίας των ερωτηθέντων

Αντικείμενο εργασίας

		Frequency	Percent	ValidPercent	Cumulative Percent
Valid	Ιατρικό προσωπικό	16	30,8	30,8	30,8
	Παραϊατρικό προσωπικό	29	55,8	55,8	86,5
	Νοσηλευτικό προσωπικό	4	7,7	7,7	94,2
	Διοικητικό προσωπικό	3	5,8	5,8	100,0
	Total	52	100,0	100,0	

Π.Α.9

Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τις γνώσεις των ερωτηθέντων
περί ακτινοφυσικής

Οι ιοντίζουσες ακτινοβολίες, κατά την άποψή σας, είναι επιβλαβείς
για την υγεία του ανθρώπου.

		Frequency	Percent	ValidPercent	Cumulative Percent
Valid	Σίγουρα	36	69,2	69,2	69,2
	Πολύ πιθανό	9	17,3	17,3	86,5
	Αρκετά πιθανό	5	9,6	9,6	96,2
	Ελάχιστα πιθανό	2	3,8	3,8	100,0
	Total	52	100,0	100,0	

Π.Α.10

Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τις γνώσεις των ερωτηθέντων
περί ακτινοφυσικής

Τα είδη της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας διαχωρίζονται σε
ιοντίζουσα και μη ιοντίζουσα.

		Frequency	Percent	ValidPercent	Cumulative Percent
Valid	Σίγουρα	35	67,3	67,3	67,3

Πολύ πιθανό	13	25,0	25,0	92,3
Αρκετά πιθανό	4	7,7	7,7	100,0
Total	52	100,0	100,0	

Π.Α.11

Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τις γνώσεις των ερωτηθέντων περί ακτινοφυσικής

Η ακτινοβολία X προκαλεί ιονισμό της ύλης.

		Frequency	Percent	ValidPercent	Cumulative Percent
Valid	Σίγουρα	31	59,6	59,6	59,6
	Πολύ πιθανό	14	26,9	26,9	86,5
	Αρκετά πιθανό	6	11,5	11,5	98,1
	Ελάχιστα πιθανό	1	1,9	1,9	100,0
	Total	52	100,0	100,0	

Π.Α.12

Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τις γνώσεις των ερωτηθέντων περί ακτινοφυσικής

Η ακτινοβολία γ χαρακτηρίζεται από μεγάλη διεισδυτικότητα.

		Frequency	Percent	ValidPercent	Cumulative Percent
Valid	Σίγουρα	36	69,2	69,2	69,2

Πολύ πιθανό	13	25,0	25,0	94,2
Αρκετά πιθανό	3	5,8	5,8	100,0
Total	52	100,0	100,0	

Π.Α.13

Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τις γνώσεις των ερωτηθέντων περί ακτινοφυσικής

Ο χρόνος ημιζωής είναι ο χρόνος που απαιτείται ώστε ο αριθμός των ραδιενεργών πυρήνων να μειωθεί στο μισό του αρχικού τους αριθμού.

		Frequency	Percent	ValidPercent	Cumulative Percent
Valid	Σίγουρα	31	59,6	59,6	59,6
	Πολύ πιθανό	17	32,7	32,7	92,3
	Αρκετά πιθανό	3	5,8	5,8	98,1
	Ελάχιστα πιθανό	1	1,9	1,9	100,0
	Total	52	100,0	100,0	

Π.Α.14

Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τις γνώσεις των ερωτηθέντων περί εργασιακών πρακτικών σύμφωνα με τους κανονισμούς ακτινοπροστασίας

Ο χρόνος, η απόσταση και η θωράκιση αποτελούν τα βασικά μέτρα ακτινοπροστασίας.

		Frequency	Percent	ValidPercent	Cumulative Percent
Valid	Σίγουρα	31	59,6	59,6	59,6
	Πολύ πιθανό	14	26,9	26,9	86,5
	Αρκετά πιθανό	7	13,5	13,5	100,0
	Total	52	100,0	100,0	

Π.Α.15

**Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τις γνώσεις των ερωτηθέντων
περί ακτινοπροστασίας**

**Το ετήσιο όριο της ενεργού δόσης για τους επαγγελματικά
εκτεθειμένους είναι 20mSv.**

		Frequency	Percent	ValidPercent	Cumulative Percent
Valid	Σίγουρα	35	67,3	67,3	67,3
	Πολύ πιθανό	10	19,2	19,2	86,5
	Αρκετά πιθανό	7	13,5	13,5	100,0
	Total	52	100,0	100,0	

Π.Α.16

**Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τις γνώσεις των ερωτηθέντων
περί εργασιακών πρακτικών σύμφωνα με τους κανονισμούς ακτινοπροστασίας**

**Τα βασικά μέτρα ακτινοπροστασίας στα εργαστήρια
Πυρηνικής Ιατρικής είναι η χρήση της απλής ιατρικής ποδιάς,
τα γάντια μιας χρήσης και το προσωπικό δοσίμετρο.**

		Frequency	Percent	ValidPercent	Cumulative Percent
Valid	Σίγουρα	36	69,2	69,2	69,2
	Πολύ πιθανό	9	17,3	17,3	86,5
	Αρκετά πιθανό	4	7,7	7,7	94,2
	Ελάχιστα πιθανό	1	1,9	1,9	96,2
	Καθόλου πιθανό	2	3,8	3,8	100,0
	Total	52	100,0	100,0	

Π.Α.17

**Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τις γνώσεις των ερωτηθέντων
περί εργασιακών πρακτικών σύμφωνα με τους κανονισμούς ακτινοπροστασίας**

**Η πιστή τήρηση των οδηγιών ακτινοπροστασίας και η ορθή
χρήση του ειδικού εξοπλισμού είναι προσωπική ευθύνη του
εργαζόμενου και καθιστά την εργασία με τα ραδιοϊσότοπα
ασφαλή.**

		Frequency	Percent	ValidPercent	Cumulative Percent
Valid	Σίγουρα	43	82,7	82,7	82,7
	Πολύ πιθανό	9	17,3	17,3	100,0
	Total	52	100,0	100,0	

Π.Α.18

**Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τις γνώσεις των ερωτηθέντων
περί ακτινοπροστασίας**

**Οι ελεγχόμενες περιοχές είναι εκείνες στις οποίες ισχύουν ειδικοί
κανόνες ακτινοπροστασίας από ιοντίζουσες ακτινοβολίες και
παρεμπόδισης της εξάπλωσης ραδιενεργού μόλυνσης.**

		Frequency	Percent	ValidPercent	Cumulative Percent
Valid	Σίγουρα	33	63,5	63,5	63,5
	Πολύ πιθανό	11	21,2	21,2	84,6
	Αρκετά πιθανό	6	11,5	11,5	96,2
	Ελάχιστ α πιθανό	2	3,8	3,8	100,0
	Total	52	100,0	100,0	

Π.Α.19

Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τις γνώσεις των ερωτηθέντων περί ακτινοπροστασίας

Η έννοια του ορίου δόσεων είναι τα ανώτερα όρια δόσεων που
έχουν το μικρότερο δυνατό κίνδυνο.

		Frequency	Percent	ValidPercent	Cumulative Percent
Valid	Σίγουρα	36	69,2	69,2	69,2
	Πολύ πιθανό	10	19,2	19,2	88,5
	Αρκετά πιθανό	3	5,8	5,8	94,2
	Ελάχιστα πιθανό	2	3,8	3,8	98,1
	Καθόλου πιθανό	1	1,9	1,9	100,0
	Total		52	100,0	100,0

Π.Α.20

Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τις γνώσεις των ερωτηθέντων περί ακτινοπροστασίας

Οι βιολογικές επιδράσεις της ακτινοβολίας εξαρτώνται από την
απορροφούμενη δόση, την ποιότητα της ακτινοβολίας (ακτίνες X, ακτίνες γ,
σωμάτια α, σωμάτια β, νετρόνια) και την ακτινοευαισθησία των ιστών και των
οργάνων.

		Frequency	Percent	ValidPercent	Cumulative Percent
Valid	Σίγουρα	42	80,8	80,8	80,8
	Πολύ πιθανό	6	11,5	11,5	92,3
	Αρκετά πιθανό	2	3,8	3,8	96,2
	Ελάχιστα πιθανό	2	3,8	3,8	100,0
	Total		52	100,0	100,0

Π.Α.21

Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τις γνώσεις των ερωτηθέντων περί ακτινοπροστασίας

Η μοναδική αιτία ραδιενέργειας είναι η αστάθεια των πυρήνων.

		Frequency	Percent	ValidPercent	Cumulative Percent
Valid	Σίγουρα	30	57,7	57,7	57,7
	Πολύ πιθανό	13	25,0	25,0	82,7
	Αρκετά πιθανό	6	11,5	11,5	94,2
	Ελάχιστα πιθανό	2	3,8	3,8	98,1
	Καθόλου πιθανό	1	1,9	1,9	100,0
	Total		52	100,0	100,0

Π.Α.22

Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τις γνώσεις των ερωτηθέντων περί ακτινοπροστασίας

Ο όρος «δόση» αναφέρεται στην ενέργεια που απορροφά το σώμα του εξεταζόμενου λόγω της εσωτερικής ακτινοβόλησης από το ραδιοϊσότοπο που του χορηγήθηκε.

		Frequency	Percent	ValidPercent	Cumulative Percent
Valid	Σίγουρα	37	71,2	71,2	71,2
	Πολύ πιθανό	8	15,4	15,4	86,5
	Αρκετά πιθανό	4	7,7	7,7	94,2
	Ελάχιστα πιθανό	3	5,8	5,8	100,0
	Total		52	100,0	100,0

Π.Α.23

**Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τις γνώσεις των ερωτηθέντων
περί ακτινοπροστασίας**

**Ο μετρητής Geiger-Müller είναι ένα όργανο για την ανίχνευση
και τη μέτρηση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας.**

		Frequency	Percent	ValidPercent	Cumulative Percent
Valid	Σίγουρα	44	84,6	84,6	84,6
	Πολύ πιθανό	8	15,4	15,4	100,0
	Total	52	100,0	100,0	

Π.Α.24

**Φύλο * Η πιστή τήρηση των οδηγιών ακτινοπροστασίας και η ορθή χρήση του
ειδικού εξοπλισμού είναι προσωπική ευθύνη του εργαζόμενου και καθιστά την
εργασία με τα ραδιοϊσότοπα ασφαλή Crosstabulation**

**Φύλο * Η πιστή τήρηση των οδηγιών ακτινοπροστασίας και η ορθή
χρήση του ειδικού εξοπλισμού είναι προσωπική ευθύνη του εργαζόμενου
και καθιστά την εργασία με τα ραδιοϊσότοπα ασφαλή Crosstabulation**

Η πιστή τήρηση των οδηγιών
ακτινοπροστασίας και η ορθή
χρήση του ειδικού εξοπλισμού
είναι προσωπική ευθύνη του
εργαζόμενου και καθιστά την
εργασία με τα ραδιοϊσότοπα
ασφαλή.

			Σίγουρα	Πολύ πιθανό	Total
Φύλο	Άρρεν	Count	18	4	22
		Expected Count	18,2	3,8	22,0
		Adjusted Residual	-,1	,1	
	Θήλυ	Count	25	5	30
		Expected Count	24,8	5,2	30,0
		Adjusted Residual	,1	-,1	
Total	Count	43	9	52	
	Expected Count	43,0	9,0	52,0	

Πίνακας
Π.Α.25
Chi- Square Tests
Chi- Square Tests

	Value	df	Asymptotic Significance (2-sided)	Exact Sig. (2- sided)	Exact Sig. (1-sided)
Pearson Chi-Square	,020 ^a	1	,887		
Continuity Correction ^b	,000	1	1,000		
Likelihood Ratio	,020	1	,887		
Fisher's exact Test				1,000	,585
Linear-by-Linear Association	,020	1	,888		
N of ValidCases	52				

a. 1 cell (25%) has expected count less than 5. The minimum expected count is 3,81.

b. Computed only for a 2x2 table

Πίνακας Π.Α.26

Φύλο * Ο μετρητής Geiger-Müller είναι ένα όργανο για την ανίχνευση και τη μέτρηση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας Crosstabulation

Φύλο * Ο μετρητής Geiger-Müller είναι ένα όργανο για την ανίχνευση και τη μέτρηση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας Crosstabulation

		Ο μετρητής Geiger-Müller είναι ένα όργανο για την ανίχνευση και τη μέτρηση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας.			
			Πολύ πιθανό	Total	
Φύλο	Άρρεν	Σίγουρα			
	Count	17	5	22	
	Expected Count	18,6	3,4	22,0	
	Adjusted Residual	-1,3	1,3		
	Θήλυ	Count	27	3	30
	Expected Count	25,4	4,6	30,0	
	Adjusted Residual	1,3	-1,3		
Total	Count	44	8	52	
	Expected Count	44,0	8,0	52,0	

Chi- Square Tests

	Value	df	Asymptotic Significance (2-sided)	Exact Sig. (2-sided)	Exact Sig. (1-sided)
Pearson Chi-Square	1,579 ^a	1	,209		
Continuity Correction ^b	,753	1	,386		
Likelihood Ratio	1,562	1	,211		
Fisher's Exact Test				,260	,192
Linear-by-Linear Association	1,549	1	,213		
N of ValidCases	52				

a. 2 cells (50, 0%) have expected count less than 5. The minimum expected count is 3,38.

b. Computed only for a 2x2 table

II.A.27

Chi- Square Tests

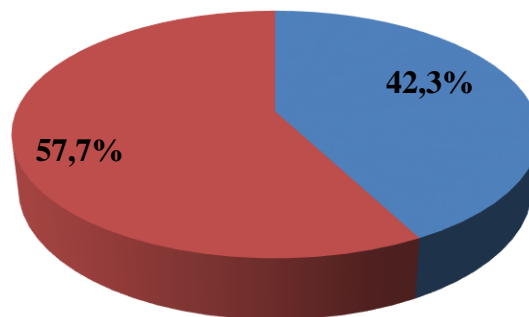
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Π.Β.1

Γράφημα πίτας του φύλου των ερωτηθέντων

Φύλο

■ Άρρεν ■ Θήλυ

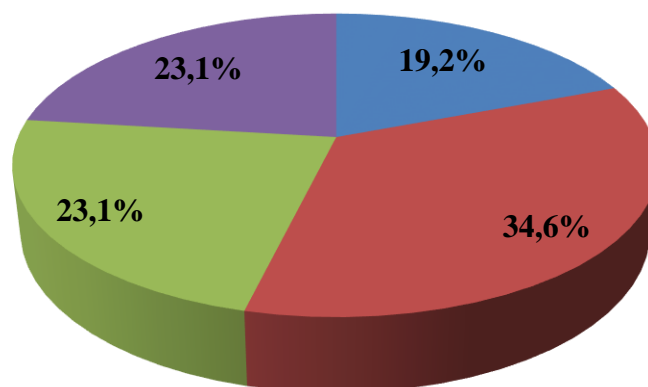


Π.Β.2

Γράφημα πίτας της ηλικίας των ερωτηθέντων

Ηλικία

■ 25-35 ■ 36-45 ■ 46-55 ■ 56-67

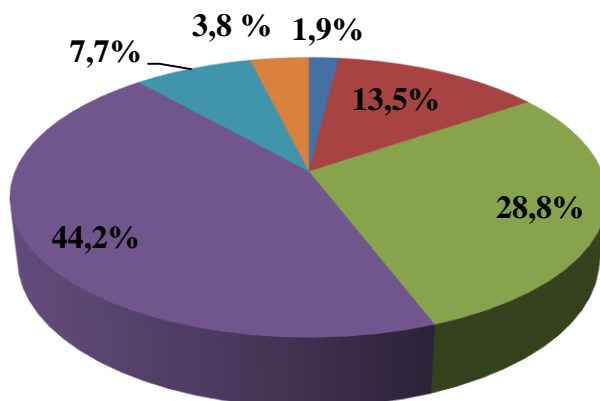


Π.Β.3

Γράφημα πίτας για το μορφωτικό επίπεδο των ερωτηθέντων

Μορφωτικό επίπεδο

- Απόφοιτος Λυκείου
- Κάτοχος πτυχίου Δ.Ε.
- Κάτοχος πτυχίου Α.Ε.Ι.
- Κάτοχος πτυχίου Τ.Ε.Ι.
- Μεταπτυχιακό δίπλωμα
- Διδακτορικό δίπλωμα

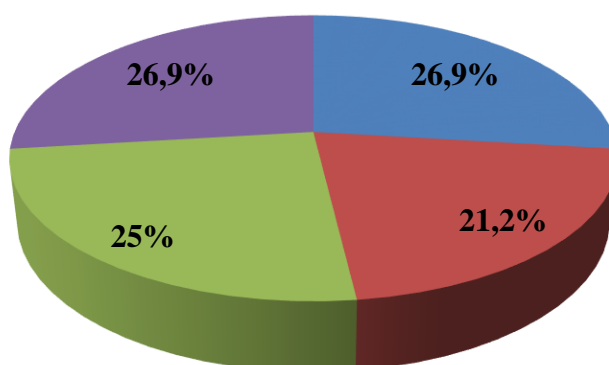


Π.Β.4

Γράφημα πίτας της προϋπηρεσίας των ερωτηθέντων

Έτη προϋπηρεσίας

- 0-10
- 11_20
- 21-30
- 31-40

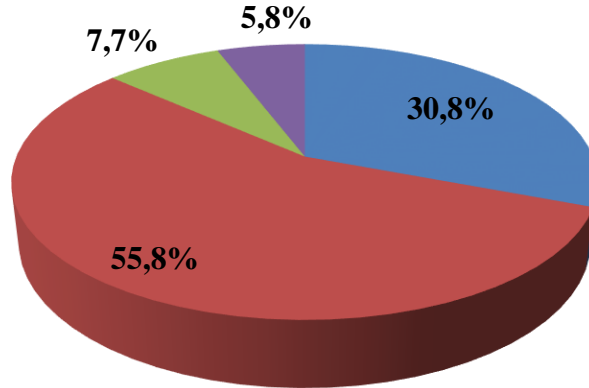


Π.Β.5

Γράφημα πίτας για το αντικείμενο εργασίας των ερωτηθέντων

Αντικείμενο εργασίας

■ Ιατρικό προσωπικό ■ Παραϊατρικό προσωπικό
■ Νοσηλευτικό προσωπικό ■ Διοικητικό προσωπικό

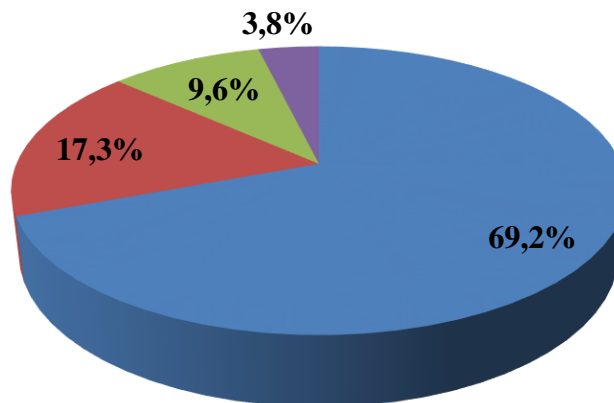


Π.Β.6

Γράφημα πίτας για το ερώτημα «Οι ιοντίζουσες ακτινοβολίες, κατά την άποψή σας, είναι επιβλαβείς για την υγεία του ανθρώπου».

Οι ιοντίζουσες ακτινοβολίες, είναι κατά την άποψή σας, επιβλαβείς για την υγεία του ανθρώπου.

■ Σίγουρα ■ Πολύ πιθανό ■ Αρκετά πιθανό ■ Ελάχιστα πιθανό

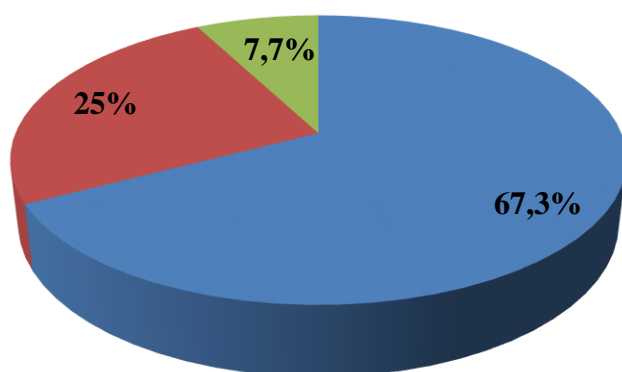


Π.Β.7

Γράφημα πίτας για το ερώτημα «Τα είδη της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας διαχωρίζονται σε ιοντίζουσα και μη ιοντίζουσα».

Τα είδη της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας διαχωρίζονται σε ιοντίζουσα και μη ιοντίζουσα.

■ Σίγουρα ■ Πολύ πιθανό ■ Αρκετά πιθανό

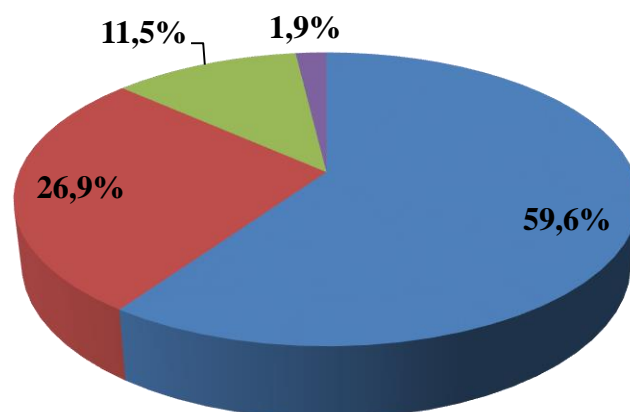


Π.Β.8

Γράφημα πίτας για το ερώτημα «Η ακτινοβολία X προκαλεί ιονισμό της ύλης».

Η ακτινοβολία X προκαλεί ιονισμό της ύλης.

■ Σίγουρα ■ Πολύ πιθανό ■ Αρκετά πιθανό ■ Ελάχιστα πιθανό

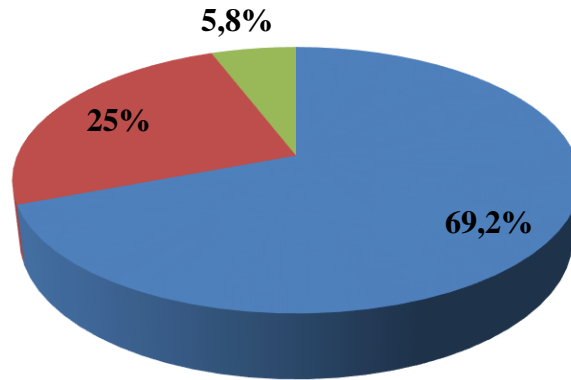


Π.Β.9

Γράφημα πίτας για το ερώτημα «Η ακτινοβολία γ χαρακτηρίζεται από μεγάλη διεισδυτικότητα».

Η ακτινοβολία γ χαρακτηρίζεται από μεγάλη διεισδυτικότητα.

■ Σίγουρα ■ Πολύ πιθανό ■ Αρκετά πιθανό

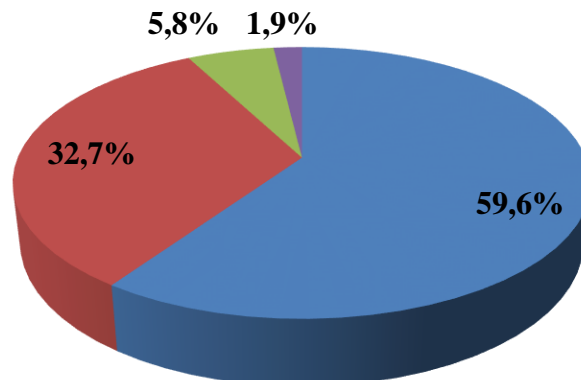


Π.Β.10

Γράφημα πίτας για το ερώτημα «Ο χρόνος ημιζωής είναι ο χρόνος που απαιτείται ώστε ο αριθμός των ραδιενεργών πυρήνων να μειωθεί στο μισό του αρχικού τους αριθμού».

Ο χρόνος ημιζωής είναι ο χρόνος που απαιτείται ώστε ο αριθμός των ραδιενεργών πυρήνων να μειωθεί στο μισό του αρχικού τους αριθμού.

■ Σίγουρα ■ Πολύ πιθανό ■ Αρκετά πιθανό ■ Ελάχιστα πιθανό

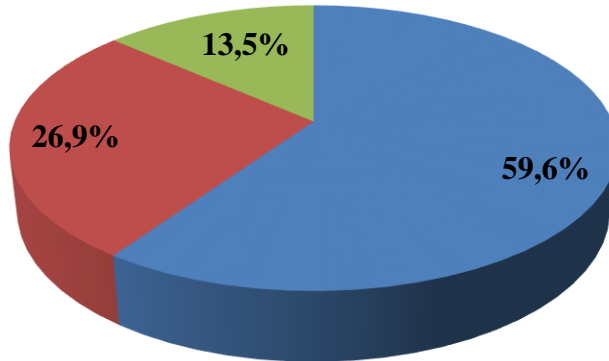


Π.Β.11

Γράφημα πίτας για το ερώτημα «Ο χρόνος, η απόσταση και η θωράκιση αποτελούν τα βασικά μέτρα ακτινοπροστασίας».

Ο χρόνος, η απόσταση και η θωράκιση αποτελούν τα βασικά μέτρα ακτινοπροστασίας,

■ Σίγουρα ■ Πολύ πιθανό ■ Αρκετά πιθανό

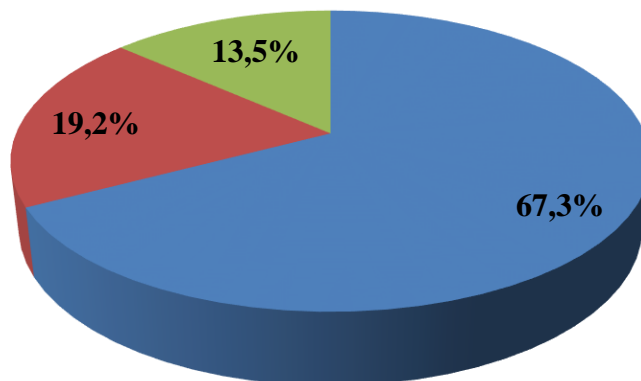


Π.Β.12

Γράφημα για το ερώτημα «Το ετήσιο όριο της ενεργού δόσης για τους επαγγελματικά εκτεθειμένους είναι 20mSv».

Το ετήσιο όριο της ενεργού δόσης για τους επαγγελματικά εκτεθειμένους είναι 20mSv.

■ Σίγουρα ■ Πολύ πιθανό ■ Αρκετά πιθανό

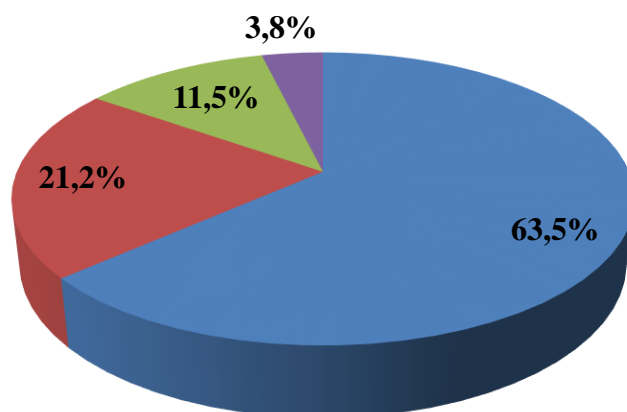


Π.Β.15

Γράφημα πίτας για το ερώτημα «Οι ελεγχόμενες περιοχές είναι εκείνες στις οποίες ισχύουν ειδικοί κανόνες ακτινοπροστασίας από ιοντίζουσες ακτινοβολίες και παρεμπόδισης της εξάπλωσης ραδιενεργού μόλυνσης».

Οι ελεγχόμενες περιοχές είναι εκείνες στις οποίες ισχύουν ειδικοί κανόνες ακτινοπροστασίας από ιοντίζουσες ακτινοβολίες και παρεμπόδισης της εξάπλωσης ραδιενεργού μόλυνσης.

■ Σίγουρα ■ Πολύ πιθανό ■ Αρκετά πιθανό ■ Ελάχιστα πιθανό

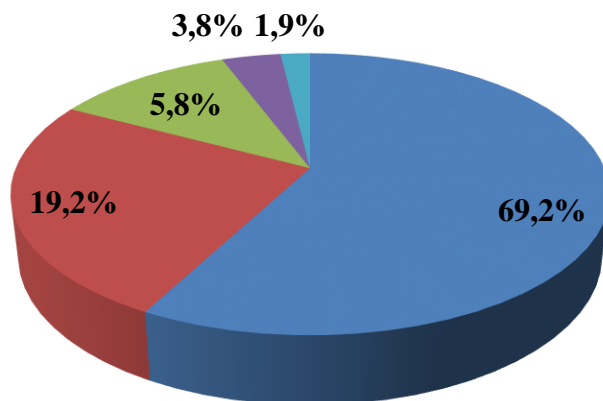


Π.Β.16

Γράφημα πίτας για το ερώτημα «Η έννοια του ορίου δόσεων είναι τα ανώτερα όρια δόσεων που έχουν το μικρότερο δυνατό κίνδυνο».

Η έννοια του ορίου δόσεων είναι τα ανώτερα όρια δόσεων που έχουν το μικρότερο δυνατό κίνδυνο.

■ Σίγουρα ■ Πολύ πιθανό ■ Αρκετά πιθανό
■ Ελάχιστα πιθανό ■ Καθόλου πιθανό

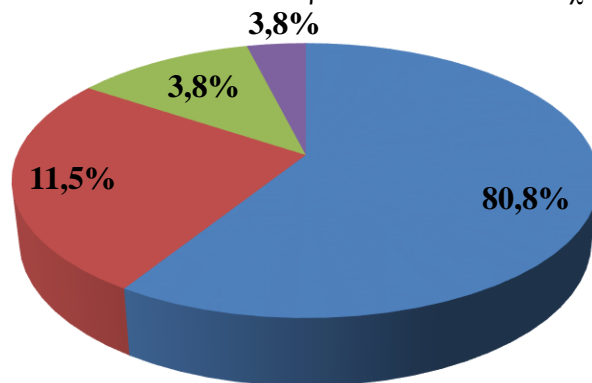


Π.Β.17

Γράφημα πίτας για το ερώτημα «Οι βιολογικές επιδράσεις της ακτινοβολίας εξαρτώνται από την απορροφούμενη δόση, την ποιότητα της ακτινοβολίας (ακτίνες X, ακτίνες γ, σωματία α, σωματία β, νετρόνια) και την ακτινοευαισθησία των ιστών και των οργάνων».

Οι βιολογικές επιδράσεις της ακτινοβολίας εξαρτώνται από την απορροφούμενη δόση, την ποιότητα της ακτινοβολίας (ακτίνες X και γ, σωματία α και β και νετρόνια) και την ακτινοευαισθησία των ιστών και των οργάνων.

■ Σίγουρα ■ Πολύ πιθανό ■ Αρκετά πιθανό ■ Ελάχιστα πιθανό

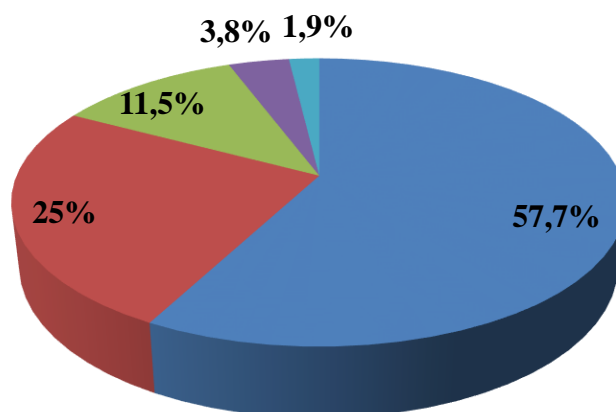


Π.Β.18

Γράφημα πίτας για το ερώτημα «Η μοναδική αιτία ραδιενέργειας είναι η αστάθεια των πυρήνων».

Η μοναδική αιτία ραδιενέργειας είναι η αστάθεια των πυρήνων.

■ Σίγουρα ■ Πολύ πιθανό
■ Αρκετά πιθανό ■ Ελάχιστα πιθανό
■ Καθόλου πιθανό

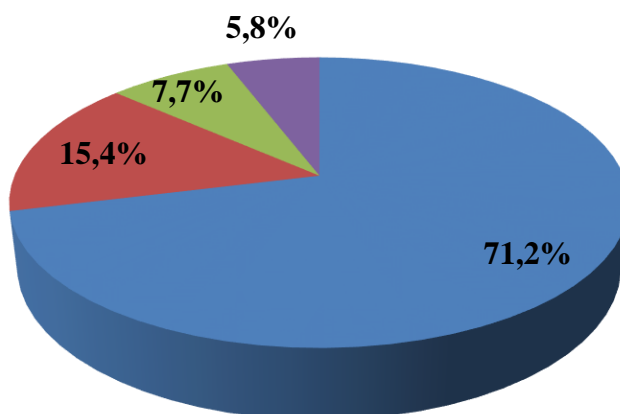


Π.Β.19

Γράφημα πίτας για το ερώτημα «Ο όρος «δόση» αναφέρεται στην ενέργεια που απορροφά το σώμα του εξεταζόμενου λόγω της εσωτερικής ακτινοβολίας από το ραδιοϊσότοπο που του χορηγήθηκε».

Ο όρος "δόση" αναφέρεται στην ενέργεια που απορροφά το σώμα του εξεταζόμενου λόγω της εσωτερικής ακτινοβολίας από το ραδιοϊσότοπο που του χορηγήθηκε.

■ Σίγουρα ■ Πολύ πιθανό ■ Αρκετά πιθανό ■ Ελάχιστα πιθανό

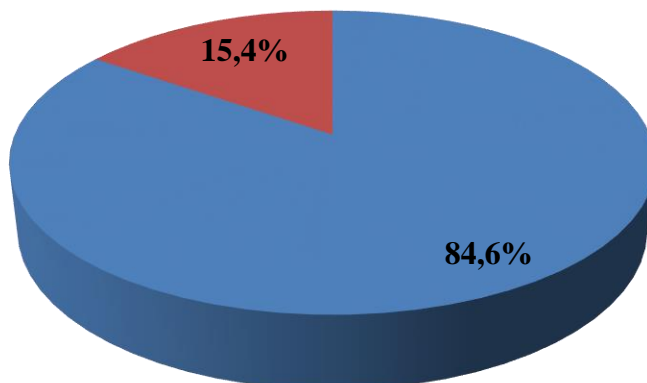


Π.Β.20

Γράφημα πίτας για το ερώτημα «Ο μετρητής Geiger-Müller είναι ένα όργανο για την ανίχνευση και τη μέτρηση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας».

Ο μετρητής Geiger-Müller είναι ένα όργανο για την ανίχνευση και τη μέτρηση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας.

■ Σίγουρα ■ Πολύ πιθανό



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ

Το ερωτηματολόγιο αυτό διανέμεται στα πλαίσια της έρευνας της διπλωματικής εργασίας που διεξάγεται από την φοιτήτρια Κορνηλία Μπεμπή του Μ.Π.Σ. «Οικονομικά και Διοίκηση της Υγείας» του Πανεπιστημίου Πειραιώς. Ο τίτλος της διπλωματικής εργασίας είναι «**Η νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την ακτινοπροστασία και η εφαρμογή της στη χώρα μας**».

Οι απαντήσεις είναι ανώνυμες και θα χρησιμοποιηθούν αποκλειστικά για ερευνητικούς σκοπούς. Σας παρακαλούμε αφιερώστε λίγο από τον χρόνο σας για να συμπληρώσετε το παρακάτω ερωτηματολόγιο. Σημειώστε την απάντηση για κάθε ερώτηση που προσεγγίζει περισσότερο την άποψή σας σχετικά με αυτήν.

ΔΗΜΟΓΡΑΦΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Φύλο:

Άρρεν Θήλυ

Ηλικία:

25-35

36-45

46-55

56-67

Επίπεδο εκπαίδευσης:

Απόφοιτος Λυκείου

Κάτοχος πτυχίου Δ.Ε.

Κάτοχος πτυχίου Α.Ε.Ι.

Κάτοχος πτυχίου Τ.Ε.Ι.

Μεταπτυχιακό δίπλωμα

Διδακτορικό δίπλωμα

Προϋπηρεσία (έτη):

0-10

11-20

21-30

31-40

Ανήκετε στο:

Ιατρικό προσωπικό

Παραϊατρικό προσωπικό

Νοσηλευτικό προσωπικό

Διοικητικό προσωπικό

1. Οι ιοντίζουσες ακτινοβολίες, κατά την άποψή σας, είναι επιβλαβείς για την υγεία του ανθρώπου.

Σίγουρα Πολύ πιθανό Αρκετά πιθανό Ελάχιστα πιθανό

Καθόλου πιθανό

2. Τα είδη της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας διαχωρίζονται σε ιοντίζουσα και μη ιοντίζουσα.

Σίγουρα Πολύ πιθανό Αρκετά πιθανό Ελάχιστα πιθανό

Καθόλου πιθανό

3. Η ακτινοβολία X προκαλεί ιονισμό της ύλης.

Σίγουρα Πολύ πιθανό Αρκετά πιθανό Ελάχιστα πιθανό

Καθόλου πιθανό

4. Η ακτινοβολία γ χαρακτηρίζεται από μεγάλη διεισδυτικότητα.

Σίγουρα Πολύ πιθανό Αρκετά πιθανό Ελάχιστα πιθανό

Καθόλου πιθανό

5. Ο χρόνος ημιζωής είναι ο χρόνος που απαιτείται ώστε ο αριθμός των ραδιενεργών πυρήνων να μειωθεί στο μισό του αρχικού τους αριθμού.

Σίγουρα Πολύ πιθανό Αρκετά πιθανό Ελάχιστα πιθανό

Καθόλου πιθανό

6. Ο χρόνος, η απόσταση και η θωράκιση αποτελούν τα βασικά μέτρα ακτινοπροστασίας.

Σίγουρα Πολύ πιθανό Αρκετά πιθανό Ελάχιστα πιθανό

Καθόλου πιθανό

7. Το ετήσιο όριο της ενεργού δόσης για τους επαγγελματικά εκτεθειμένους είναι 20mSv.

Σίγουρα Πολύ πιθανό Αρκετά πιθανό Ελάχιστα πιθανό

Καθόλου πιθανό

8. Τα βασικά μέτρα ακτινοπροστασίας στα εργαστήρια Πυρηνικής Ιατρικής είναι η χρήση της απλής ιατρικής ποδιάς, τα γάντια μιας χρήσης και το προσωπικό δοσίμετρο.

Σίγουρα Πολύ πιθανό Αρκετά πιθανό Ελάχιστα πιθανό

Καθόλου πιθανό

9. Η πιστή τήρηση των οδηγιών ακτινοπροστασίας και η ορθή χρήση του ειδικού εξοπλισμού είναι προσωπική ευθύνη του εργαζόμενου και καθιστά την εργασία με τα ραδιοϊσότοπα ασφαλή.

Σίγουρα Πολύ πιθανό Αρκετά πιθανό Ελάχιστα πιθανό

Καθόλου πιθανό

10. Οι ελεγχόμενες περιοχές είναι εκείνες στις οποίες ισχύουν ειδικοί κανόνες ακτινοπροστασίας από ιοντίζουσες ακτινοβολίες και παρεμπόδισης της εξάπλωσης ραδιενεργού μόλυνσης.

Σίγουρα Πολύ πιθανό Αρκετά πιθανό Ελάχιστα πιθανό

Καθόλου πιθανό

11. Η έννοια του ορίου δόσεων είναι τα ανώτερα όρια δόσεων που έχουν το μικρότερο δυνατό κίνδυνο.

Σίγουρα Πολύ πιθανό Αρκετά πιθανό Ελάχιστα πιθανό

Καθόλου πιθανό

12. Οι βιολογικές επιδράσεις της ακτινοβολίας εξαρτώνται από την απορροφούμενη δόση, την ποιότητα της ακτινοβολίας (ακτίνες X, ακτίνες γ, σωματία α, σωματία β, νετρόνια) και την ακτινοευαισθησία των ιστών και των οργάνων.

Σίγουρα Πολύ πιθανό Αρκετά πιθανό Ελάχιστα πιθανό

Καθόλου πιθανό

13. Η μοναδική αιτία ραδιενέργειας είναι η αστάθεια των πυρήνων.

Σίγουρα Πολύ πιθανό Αρκετά πιθανό Ελάχιστα πιθανό

Καθόλου πιθανό

14. Ο όρος «δόση» αναφέρεται στην ενέργεια που απορροφά το σώμα του εξεταζόμενου λόγω της εσωτερικής ακτινοβόλησης από το ραδιοϊσότοπο που του χορηγήθηκε.

Σίγουρα Πολύ πιθανό Αρκετά πιθανό Ελάχιστα πιθανό

Καθόλου πιθανό

15. Ο μετρητής Geiger-Müller είναι ένα όργανο για την ανίχνευση και τη μέτρηση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας.

Σίγουρα Πολύ πιθανό Αρκετά πιθανό Ελάχιστα πιθανό

Καθόλου πιθανό

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

Αναστασοπούλου Δ. Ιωάννα και Δρίτσα Βασιλική (2007), Ραδιοχημεία-Διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων-Τοξικότητα ραδιενεργών ισοτόπων-Τμήμα χημικών μηχανικών, Creative Commons, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Γιαννακούρης Ν. και Νικολιουδάκης Ν. και Κοκκορόγιαννης Θ. (2015), Οδηγός εργαστηριακών και φροντιστηριακών ασκήσεων βιολογίας, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Αθήνα

Δεμάδης Κωνσταντίνος (2009), Δομή των μορίων, Τμήμα Χημείας, Πανεπιστήμιο Κρήτης

Δημητρίου Παναγιώτης (2016), Διεθνείς και Ελληνικοί κανονισμοί ακτινοπροστασίας, 37^ο Πανελλήνιο Καρδιολογικό συνέδριο, Αθήνα

Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής και Ιατρική Σχολή και Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών και Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (2010), Μαθήματα Ακτινοπροστασίας για χειριστές ιατρικών μηχανημάτων ιοντιζουσών ακτινοβολιών, Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, Αθήνα

Ευρωπαϊκή Ένωση (2016), Συνθήκη Ευρατόμ ενοποιημένη έκδοση, Υπηρεσία εκδόσεων της Ευρωπαϊκής Ένωσης, Λουξεμβούργο

Ζαφειρόπουλος Β. (2015), Μέτρηση σύστασης του ανθρώπινου σώματος, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Αθήνα

Κονταρίδης Δημήτρης (2015), Φυσικοχημεία Ι: Ενότητα 8- Ατομικά τροχιακά, Πανεπιστήμιο Πατρών

Κουτρομπής Π. Γεώργιος (2000), Ακτινοπροστασία , Εκδόσεις Λύχνος, Αθήνα

Κουτρομπής Π. Γεώργιος (2003), Ακτινοφυσική 1, Εκδόσεις Λύχνος, Αθήνα

Κουτρομπής Π. Γεώργιος (2003), Ακτινοφυσική 2, Εκδόσεις Λύχνος, Αθήνα

Μάρκος Άγγελος (2012), Οδηγός ανάλυσης αξιοπιστίας και εγκυρότητας ψυχομετρικών κλιμάκων με το SPSS, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Αλεξανδρούπολη

Μπατσίδης Δ. Απόστολος (2014), Στατιστική ανάλυση δεδομένων με το S.P.S.S.- Διδακτικές Σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Τμήμα Μαθηματικών, Ιωάννινα

Λύρα Μαρία και Βαμβακάς Ιωάννης και Γαβριηλέλλη Μαρία και Χατζηγιάνης Χρήστος (2010), Η απορροφούμενη δόση στη σπινθηρομαστογραφία και στην ακτινολογική μαστογραφία, Hell J Nucl Med 13 (1): 81-87

Πέππα Σοφία (2013), Μελέτη και σχεδίαση αναβάθμισης της εργαστηριακής εκπαίδευσης στο αντικείμενο των υψηλών τάσεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Σπηλιόπουλος Ιωακείμ και Βάκρος Ιωάννης και Ξαπλαντέρη Μαρία (2015), Χημεία – στοιχεία γενικής, οργανικής και βιολογικής χημείας, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Νομοθετικά κείμενα

Οδηγία 96/29/Euratom (1996), «Για τον καθορισμό των βασικών κανόνων ασφαλείας για την προστασία των εργαζομένων και του πληθυσμού»

Οδηγία 97/43/Euratom (1997), «Για την προστασία της υγείας από τους κινδύνους κατά την έκθεση σε ιοντίζουσα ακτινοβολία για ιατρικούς λόγους»

Οδηγία 2013/59/Euratom (2013), «Για τον καθορισμό βασικών προτύπων ασφαλείας για την προστασία από τους κινδύνους που προκύπτουν από ιοντιζουσες ακτινοβολίες και κατάργηση των οδηγιών 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom και 2003/122/Euratom»

«Περί προστασίας εξ ιοντιζουσών ακτινοβολιών», Νομοθετικό διάταγμα υπ' αριθ. 181 , ΦΕΚ /Α347/20.11.1974.

Προεδρικό Διάταγμα (2013), Προσαρμογή της ελληνικής νομοθεσίας στην Οδηγία 2013/59/Ευρατόμ του Συμβουλίου της 5^{ης} Δεκεμβρίου 2013 για τον καθορισμό βασικών προτύπων ασφαλείας για την προστασία από τους κινδύνους που προκύπτουν από τις ιοντιζουσες ακτινοβολίες και την κατάργηση των οδηγιών 89/618/Ευρατόμ, 90/641/Ευρατόμ, 96/29/Ευρατόμ, 97/43/Ευρατόμ και 2003/122/Ευρατόμ (ΕΕ L 13/17.1.2014) , Θέσπιση Κανονισμών Ακτινοπροστασίας

Έγκριση Κανονισμών Ακτινοπροστασίας", Κοινή Υπουργική Απόφαση υπ' αριθ. 1014(ΦΟΡ) 94, ΦΕΚ 216/Β/6.03.2001

Ξενόγλωσση

Agostini P. and Petite G. (1988), Photoelectric effect under strong irradiation, Contemporary Physics Journal, 29, 57-77

Anderson J.G. (1945), William Morgan and x-rays, Transactions of the Faculty of Actuaries, 17:219-221

Arabatzis Theodore (2009), Cathode Rays. In: Greenberger D., Hentschel K., Weinert F. Compendium of Quantum Physics. Springer, Berlin, Heidelberg

Aschan Carita (1999), Applicability of thermoluminescent dosimeters in X-ray organ dose determination and in the dosimetry of systemic and boron neutron capture radiotherapy, University of Helsinki, Helsinki

- Bewick V. and Cheek L. and Ball J. (2004). Statistics review 8: Qualitative data - tests of association, Crit Care (8):46–53
- Buchwald Z. Jed (1994), The Creation of Scientific Effects: Heinrich Hertz and Electric Waves, The University of Chicago Press, Chicago and London
- Central Michigan University (2012), Radiation Safety Manual
- Chao Yu and Rui-Yun Peng (2017), Biological effects and mechanisms of shortwave radiation: a review, Military Medical Research (4):24
- Corson W. David (1968), Pierre Poliniere, Francis Hauksbee, and Electroluminescence: A Case of Simultaneous Discovery, Isis 59, no.4:402-413
- Cottingham W.N. and Greenwood D.A. (1992), Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική (μετάφραση από το πρωτότυπο: An introduction to Nuclear Physics), Εκδόσεις Τυπωθήτω, Αθήνα
- Cronbach J. Lee (1951), Coefficient alpha and the internal structures of test, Psychometrika, volume 16, issue 3, pp. 297-334
- Davidovits P. (2007), Physics in Biology and Medicine third edition, Complementary Science series, Academic Press, U.S.A.
- Dowsett J. David and Kenny A. Patrick and Johnston R. Eugene (2006), The Physics of Diagnostic Imaging 2nd edition, Hodder Arnold, London
- El-Mantani Ordoulidis S. and Siabanopoulou M. (2009), Effective doses in Nuclear Medicine diagnostic procedures in Greece, Hell J Nucl Med 12 (3): 304-306
- Glasser Otto (1993), Wilhelm Conrad Röntgen and the Early History of the Roentgen Rays, Norman Publishing

- Hunter N. and Muirhead CR. (2009), Review of relative biological effectiveness dependence on linear energy transfer for low LET- radiations, *Journal of Radiological Protection* Mar 29 (1): 5-21
- IAEA (2007), IAEA Safety Glossary Terminology used in Nuclear safety and Radiation Protection, International Atomic Energy Agency, Vienna
- IAEA Safety standards series no. GSR part 3 (2011), Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards, International Atomic Energy Agency, Vienna
- ICRP (2011), Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation (Report 85), *Journal of the ICRP: Volume 11, No 1*, Oxford University Press
- ICRP (2007), The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (Publication 103) - *Annals of the ICRP*, Elsevier Ltd
- ICRP (1991), 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (Publication 60), Pergamon Press, Oxford
- ICRP (1996), Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (Publication 73), Pergamon Press, Oxford
- McCullough H. Cynthia and Schueler A. Beth (2000), Calculation of effective dose, *Medical Physics* Volume 27, issue 5, pages 828-837
- Melsen G. Van (2004), *From Atomos to Atom: The history of the concept Atom*, Dover Phoenix editions
- Mossman KL and Hill LT (1982), Radiation risks in pregnancy, *Obstet Gynecol* 60 (2):237- 242

National Research Council (2006), Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2, The National Academies Press, Washington D.C.

Norman M. Kroll and Walter Wada (1955), Internal pair production associated with the emission of high- energy gamma rays, Physical Review Journals Archive 98, 1355

Official Journal of the European Union (2010), Consolidated version of the treaty establishing the European Atomic Energy Community, C 84

Raman, C.V. (1928), A classical derivation of the Compton effect, Indian Journal of Physics Vol. 3, p357- 369, Indian Association for the Cultivation of Science

Report of the Education and Training of Medical Physicists Committee (2009), Academic Program Recommendations for Graduate Degrees in Medical Physics, American Association of Physicists in Medicine

Thomas, A.M.K. and Banerjee, A.K. (2013), The history of Radiology, Oxford University Press

UNSCEAR (2000), Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly with Scientific Annexes, Volume II: Effects. United Nations, New York

Διαδικτυακές Πηγές

<https://pubs.rsna.org/doi/full/10.1148/rg.284075206>

<http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGLC107/144/1032,3725/>

http://eclass.uth.gr/eclass/modules/document/file.php/DIB198/MOLBIOL_Sarris.pdf

<https://www.oecd-nea.org/brief/brief-10.html>

<http://www.efie.gr/index.php/gr/medicalphysicist/role-in-medical-applications>

http://embryodose.med.uoc.gr/images/Guidelines_final_2.pdf

<https://www.britannica.com/biography/Alessandro-Volta>

https://en.wikipedia.org/wiki/Heinrich_Daniel_Ruhmkorff

<https://www.aua.gr/gpapadopoulos/files/perigrafiki08.pdf>

<https://physicsgg.me/2014/11/08η-ανακάλυψη-των-ακτίνων-γ-από-τον-rontgen/>

<https://mediasrv.aua.gr/eclass/modules/video/file.php?course=ETDA137&id=345>

<https://www.britannica.com/biography/Isaac-Newton>

<http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGL-C112/52/390,1505/>

<http://www.somaomotimon.uoa.gr/fileadmin/somaomotimon.uoa.gr/uploads/doc/dialexeis/BLASTOKYTTARA.pdf>

<http://www.greek-language.gr/certification/research/lexicon/show.html?id=118>

http://www.physics.ntua.gr/~dris/FYS_B_LYK.PDF/C_FYBL171-.pdf