



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

# **Ραδιενεργοί Ρύποι και οι Επιπτώσεις τους στον Ανθρώπινο Οργανισμό**

**Πετράκη Ευαγγελία**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των  
απαιτήσεων για την απόκτηση του  
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

2016



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

# Ραδιενεργοί Ρύποι και οι Επιπτώσεις τους στον Ανθρώπινο Οργανισμό

Σπουδάστρια: Πετράκη Ευαγγελία



Επιβλέπων Καθηγητής: Βασίλης Μποντόζογλου

Βόλος, Οκτώβριος 2016

© 2016 Πετράκη Ευαγγελία

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα

(Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

**Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

**Πρώτος Εξεταστής:** Δρ. Βασίλης Μποντόζογλου  
**(Επιβλέπων)** Καθηγητής Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

**Δεύτερος Εξεταστής:** Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος  
Καθηγητής Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

**Τρίτος Εξεταστής:** Δρ. Νικόλαος Χασιώτης  
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Βόλος, Οκτώβριος 2016

## Ευχαριστίες

Με τη Διπλωματική Εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Θα ήθελα λοιπόν, με την αφορμή αυτή, να ευχαριστήσω όλους εκείνους που στάθηκαν δίπλα μου, σε ολόκληρη τη φοιτητική μου πορεία. Καταρχήν, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, που μου έδωσε τη δυνατότητα να σπουδάσω, και που πάντα με στήριζε στις επιλογές μου.

Σε σχέση με τη Διπλωματική Εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Βασίλη Μποντόζογλου, Καθηγητή της Σχολής, ως επιβλέποντα της διπλωματικής μου, για τη συνεργασία μας καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της και τους κ. Νικόλαο Ανδρίτσο και Νικόλαο Χασιώτη που δέχτηκαν να είναι μέλη της τριμελούς επιτροπής αξιολόγησης.

Ευχαριστώ πολύ!

# **Ραδιενεργοί Ρύποι και οι Επιπτώσεις τους στον Ανθρώπινο Οργανισμό**

**Πετράκη Ευαγγελία**

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

**Επιβλέπων Καθηγητής:** Δρ. Μποντόζογλου Βασίλης, Καθηγητής  
στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, αναλύεται η έννοια της ραδιενέργειας και οι επιπτώσεις που αυτή επιφέρει στον ανθρώπινο οργανισμό.

Κάθε μορφή ύλης αποτελείται από άτομα, τα περισσότερα από τα οποία είναι σταθερά. Οι εξαιρέσεις, δηλαδή τα άτομα που έχουν ασταθείς πυρήνες, λέγονται «ραδιενεργά», με πιο γνωστό το ουράνιο. Προκειμένου να γίνει σταθερός, ο ασταθής πυρήνας μεταβάλλεται και στη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, εκπέμπει ακτινοβολία με τη μορφή μικρών σωματιδίων, τα άλφα και βήτα και των ακτίνων γάμμα και Χ. Όταν ακτινοβολία των παραπάνω τύπων διαπερνά το ανθρώπινο σώμα, προκαλεί αλλαγές στα κύτταρα. Αυτό μπορεί να προκαλέσει χημικές αλλαγές οι οποίες ίσως να βλάψουν ή ακόμη και να τα σκοτώσουν, με αποτέλεσμα να προκαλούνται βιολογικές επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό, ο βαθμός και η ένταση των οποίων εξαρτάται από τη δόση και το είδος της ακτινοβολίας, το χρονικό διάστημα στο οποίο εκτέθηκε κάποιος και την απόσταση που αυτός είχε από την πηγή της ακτινοβολίας. Οι διεθνείς φορείς που ασχολούνται με τη μελέτη των ραδιενεργών ρύπων, δίνουν ποσοτικοποιημένα όρια δόσεων σύμφωνα με τα οποία η υπέρβασή τους προκαλεί από μηδαμινές βιολογικές επιπτώσεις μέχρι και θάνατο αλλά και οδηγίες για το πως μπορεί το κοινωνικό σύνολο να προστατευθεί καλύτερα από τη ραδιενέργεια, τόσο στην εργασία του, όσο και γενικά στην καθημερινότητά του .

# Radioactive pollutants and their effects on the human body

## ABSTRACT

As part of this work, it is analyzed the concept of radioactivity and the effects it brings to the human body.

Any form of matter consisting of atoms, most of which are constant. The exemptions, ie atoms who have unstable nuclei, called "radioactive", with most known uranium. In order to become stable, the unstable nucleus changes, and during this process emit radiation in the form of small particles, the alpha and beta and gamma and X-rays. When radiation of the above formulas penetrate the human body, causes changes in the cells. This can cause chemical changes that may harm or even kill them and may result in biological effects on the human body, the intensity of which depends on the dose and type of radiation, the period in which someone is exposed and the distance that he was with the source of radiation. The international organizations concerned with the study of radioactive pollutants, give quantified dose limits in accordance with which exceeded causes of minimal biological impacts to death and instructions on how society can be better protected from radiation, both in work and generally in everyday life.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	11
1. Τι είναι ραδιενέργεια.....	13
1.1 Ιστορική αναδρομή της ραδιενέργειας.....	21
<b>ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</b>	
2 Δομή του πυρήνα – Αποδιέγερση του πυρήνα.....	24
2.1 Ραδιενεργές διασπάσεις.....	27
2.1.1 Διάσπαση με εκπομπή σωματιδίων α.....	28
2.1.2 Διάσπαση με εκπομπή σωματιδίων β.....	30
2.1.3 Διάσπαση με ακτινοβολία γ.....	32
<b>ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΟΙ ΡΥΠΟΙ</b>	
3 Τι είναι οι ραδιενεργοί ρύποι.....	34
3.1 Που βρίσκονται οι ραδιενεργοί ρύποι.....	38
3.2 Ποιοί είναι οι κυριότεροι ραδιενεργοί ρύποι.....	49
<b>ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟ</b>	
4 Βιολογικές επιπτώσεις των ραδιενεργών ρύπων στον ανθρώπινο οργανισμό.....	57
4.1 Η Ραδιενέργεια δεν είναι πάντα βλαβερή .....	68
<b>ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΩΝ ΡΥΠΩΝ</b>	
5 Δόση ραδιενεργών ρύπων.....	70
6 Φορείς καθορισμού προδιαγραφών και ελέγχου της ραδιενέργειας.....	76
6.1 Όρια δόσεων για τη ραδιενέργεια .....	82

<b>7</b>	<b>ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΠΟ ΤΗ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ.....</b>	<b>91</b>
	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>93</b>
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>94</b>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανακάλυψη το 1939 ότι η ενέργεια που περιέχεται εντός του ατομικού πυρήνα μπορεί να απελευθερωθεί, έχει οδηγήσει σε μερικές από τις πιο μεγάλες εξελίξεις στην ανθρώπινη ιστορία (Merril Eisenbud, 1987). Το γεγονός ότι η ανακάλυψη της πυρηνικής σχάσης συνέπεσε με το ξέσπασμα του Β' Παγκοσμίου Πολέμου συνετέλεσε στην πρώτη εφαρμογή της πυρηνικής ενέργειας, η οποία ήταν προφανώς για στρατιωτικούς σκοπούς. Η δραματική ανακοίνωση της καταστροφής της Χιροσίμα από ένα πυρηνικό όπλο δημιούργησε την εικόνα της καταστροφικής δύναμης του "ατόμου" και έχει αποτυπωθεί ανεξίτηλα στη συνείδηση των πολιτών του κόσμου.



Το μεγαλύτερο όφελος από τη διαδικασία σχάσης ήταν ότι υποσχέθηκε να παρέχει μια πηγή ενέργειας που θα εξασφάλιζε ένα υψηλότερο βιοτικό επίπεδο στις χώρες που δεν έχουν επαρκή αποθέματα ορυκτών καυσίμων. Καθώς οι ενεργειακές απαιτήσεις του κόσμου αυξάνονται και τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων τείνουν να ελαχιστοποιηθούν, η πυρηνική ενέργεια είναι βέβαιο ότι θα διαδραματίσει ολοένα και σημαντικότερο ρόλο στην πολιτική οικονομία. Για σχεδόν μισό αιώνα μετά τη σκοπιμότητα της λειτουργίας ενός

πυρηνικού αντιδραστήρα αποδείχθηκε ότι στην πραγματικότητα η πυρηνική ενέργεια παράγει ένα μεγάλο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται σε πολλές χώρες του κόσμου.

Ωστόσο, ο συνδυασμός της δημόσιας ανησυχίας σχετικά με τις επιπτώσεις των πυρηνικών αντιδραστήρων, με μια παγκόσμια ύφεση που ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του 1970 και την απρόβλεπτη αύξηση του κόστους της κατασκευής των πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, οδήγησε σε μια πολύ μικρότερη εξάρτηση από την πυρηνική ενέργεια από αυτήν που αναμενόταν. Σήμερα, περίπου το 17% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται από πυρηνικά εργοστάσια, αλλά σε ορισμένες χώρες όπως η Γαλλία, πάνω από το 75% της ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται από πυρηνική ενέργεια. Οι Ηνωμένες Πολιτείες, από την άλλη πλευρά, παράγουν μόνο περίπου το 15% της ηλεκτρικής ενέργειας από την πυρηνική ενέργεια <sup>[1]</sup>.

Μια λιγότερο εμφανή, αλλά εξαιρετικά σημαντική συμβολή της πυρηνικής ενέργειας για την ανθρωπότητα, ήταν οι ποσότητες των ραδιονουκλιδίων που υπάρχουν διαθέσιμες. Στους τομείς της ιατρικής και βιολογικής έρευνας, η χρήση ραδιενεργών ισοτόπων είναι τώρα τόσο κοινός τρόπος που δεν είναι δυνατή πλέον η επίγνωση της έρευνας που έχει γίνει. Η χρήση των ραδιονουκλιδίων ως ερευνητικό εργαλείο έχει εισέλθει σε ερευνητικά εργαστήρια και εκατοντάδες ανακαλύψεις στις βιο-ιατρικές επιστήμες, δεν θα ήταν δυνατές, αν δεν ήταν η άμεση διαθεσιμότητα των ραδιονουκλιδίων.

Δυστυχώς, δεν μπορούμε να ξεχάσουμε και την αρνητική πλευρά της πυρηνικής ενέργειας όπως το ενδεχόμενο ενός πυρηνικού πολέμου. Όπως συμβαίνει σε όλες τις μεγάλες τεχνολογικές προόδους, οι άνθρωποι έχουν τη σοφία να χρησιμοποιήσουν τις γνώσεις τους εποικοδομητικά, ή να τις χρησιμοποιήσουν για αντίθετα αποτελέσματα. Μόνο ο χρόνος θα δείξει αν η πυρηνική ενέργεια έχει χρησιμοποιηθεί σε ισορροπία για να φέρει ευλογίες στην ανθρωπότητα ή να επιταχύνει την κοινωνική καταστροφή της.

## 1. Τι είναι ραδιενέργεια

**Η ραδιενέργεια που βρίσκεται στο περιβάλλον έχει μελετηθεί εκτενώς σε όλο τον κόσμο για περισσότερο από 50 χρόνια.** Η πρώτη ατομική βόμβα πυροδοτήθηκε στην έρημο του Νέου Μεξικού τον Ιούλιο του 1945. Ο βομβαρδισμός της **Χιροσίμα** <sup>[2]</sup> στις 6 Αυγούστου του 1945 ήταν όμως η πυρηνική επίθεση στην οποία αποκαλύφθηκε το τεράστιο καταστροφικό δυναμικό των πυρηνικών εκρήξεων στο κοινό και η βόμβα που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου *ουρανίου 235* στην οποία είχε δοθεί το προσωνύμιο *Little Boy (αγοράκι)* στο κέντρο συναρμολόγησης και δοκιμών. Ακολούθησε αυτή στο **Ναγκασάκι** λίγες μέρες αργότερα στις 9 Αυγούστου του 1945 και η βόμβα είχε ως γόμωση το *πλουτώνιο* και είχε λάβει το προσωνύμιο *Fat Man (χοντρός)*.

Το πυρηνικό ατύχημα του **Τσερνόμπιλ** της Ουκρανίας, στις 26 Απριλίου του 1986, προήλθε από μια σειρά μη προβλεπόμενων χειρισμών και λαθών και οφείλεται σε μεγάλο βαθμό σε σχεδιαστικές ατέλειες του αντιδραστήρα που χρησιμοποιούσε το εργοστάσιο, με αποτέλεσμα την απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων Καισίου <sup>137</sup>Cs και Ιωδίου <sup>131</sup>I. Το ατύχημα ήταν της τάξης του μέγιστου προβλεπόμενου ατυχήματος στην Διεθνή Κλίμακα Πυρηνικών Γεγονότων και διατάραξε σοβαρότατα τις οικονομικές και κοινωνικές συνθήκες που επικρατούσαν στις γύρω περιοχές, ενώ είχε σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην υγεία <sup>[3]</sup>. Τελευταία ήταν η πυρηνική καταστροφή της **Φουκουσίμα** την άνοιξη του 2011 όπου σημειώθηκαν εκρήξεις σε αντιδραστήρες του σταθμού και καταγράφηκε διαρροή μεγάλης ποσότητας ραδιενέργειας στο περιβάλλον. Τα επίπεδα της ραδιενέργειας που εκλύθηκε από το ατύχημα στο Τσερνόμπιλ ήταν 400 φορές υψηλότερα σε σχέση με εκείνα των βομβών που έπεσαν στη Χιροσίμα και στο Ναγκασάκι. Οι εκρήξεις των βομβών απελευθέρωσαν μεγάλα ποσά ακτίνων γάμμα και νετρονίων για ένα μικρό διάστημα χρόνου και προκάλεσαν μεγάλης έκτασης μόλυνση του περιβάλλοντος. Το ατύχημα του Τσερνόμπιλ (το οποίο από τεχνικής απόψεως δεν θεωρείται πυρηνική έκρηξη, αλλά απελευθέρωση ατμού που προκλήθηκε από απότομη αύξηση της θερμοκρασίας) οδήγησε στην έκλυση μεγάλων ποσών ραδιενέργειας από τον αντιδραστήρα. Εκτός από το καίσιο-137 και το

στρόντιο-90 (τα οποία έχουν χρόνο ημιζωής περί τα 30 χρόνια), απελευθερώθηκε επίσης πλουτώνιο, με χρόνο ημιζωής 24.000 χρόνια. Τα κυρίαρχα αυτά πυρηνικά ατυχήματα, εξαιτίας της παγκόσμιας επιρροής τους, έχουν δώσει κίνητρα αλλά και τη δυνατότητα στους επιστήμονες να επεκτείνουν την έρευνά τους, να βελτιώσουν τις αναλυτικές τεχνικές τους καθώς και να αναπτύξουν νέες για την ανίχνευση και την ποσοτικοποίηση των ραδιονουκλιδίων που θέτουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία και ύπαρξη, καθώς και το περιβάλλον στο οποίο ζει ο άνθρωπος.

Ο όρος ραδιενέργεια χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τη Μαρί Κιουρί λίγα χρόνια μετά την ανακάλυψη του φαινομένου από τον Ανρί Μπεκερέλ το 1896 και ήταν αυτή που κόστισε τη ζωή της.

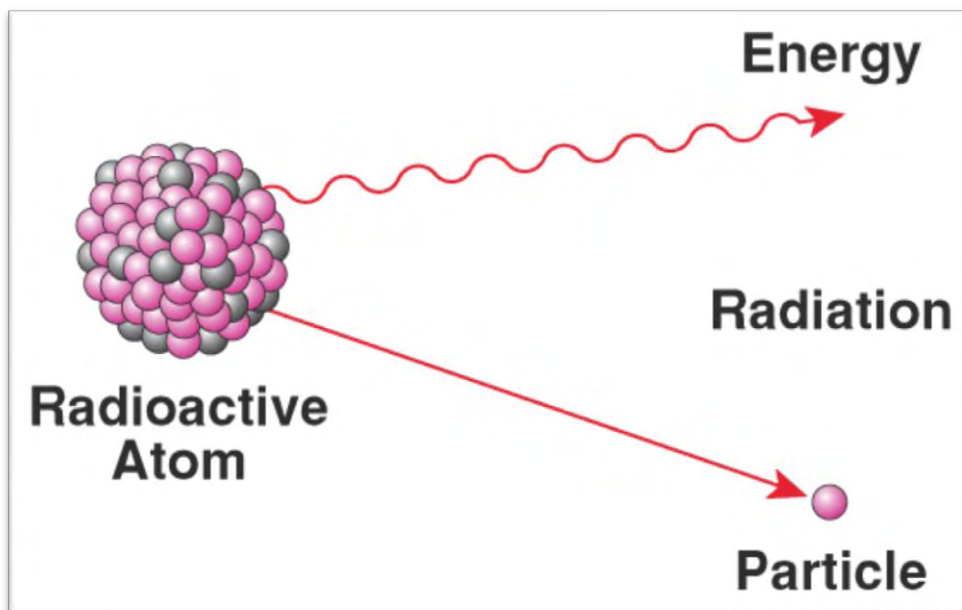
• • •  
Ξεκινώντας, να εξηγήσουμε  
κάποια βασικά στοιχεία για  
την έννοια της ραδιενέργειας.

• • •



**Ραδιενέργεια** είναι η διαδικασία της αυθόρμητης αποσύνθεσης και του μετασχηματισμού των ασταθών ατομικών πυρήνων, οι οποίοι ονομάζονται ραδιονουκλίδια και συνοδεύεται από την εκπομπή πυρηνικών σωματιδίων (*σωματίδια α ή β*) ή/και ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας πολύ μικρού μήκους κύματος (*αναφέρεται επίσης και ως πυρηνική ακτινοβολία*) (*ακτίνες γ και Χ*) (Michael F. L'Annunziata, 2007). Δηλαδή με πιο απλά λόγια, ραδιενέργεια είναι το φαινόμενο όπου ένας ασταθής πυρήνας ορισμένων χημικών στοιχείων ξαφνικά μετατρέπεται σε πυρήνα άλλου στοιχείου και την ίδια στιγμή εκπέμπει σωματίδια ή ακτινοβολία <sup>[4]</sup>. Αποτελεί ένα πρωτογενή αέριο ρύπο (σημειώσεις Ατμοσφαιρική Ρύπανση, Ν. Ανδρίτσος) <sup>[5]</sup>, ο οποίος προέρχεται από φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές όπως είναι οι

βιομηχανίες ατομικής ενέργειας (εξόρυξη, άλεση, επεξεργασία, παρασκευή σχάσιμων καυσίμων), οι πυρηνικοί αντιδραστήρες, από εκρήξεις ατομικών βομβών αλλά και μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ορυχεία ουρανίου. Στην πραγματικότητα, η μεγαλύτερη έκθεση προκαλείται από φυσικές πηγές που βρίσκονται ανέκαθεν στο περιβάλλον και ο κύριος συντελεστής για την έκθεση από τεχνητές πηγές είναι η χρήση της ακτινοβολίας στην ιατρική σε όλο τον κόσμο (UNEP 2016) <sup>[6]</sup>.



Σχήμα 1.1. Η ραδιενεργός διάσπαση  
(<https://geoinfo.nmt.edu/resources/uranium/basics.html>)

**Ραδιονουκλίδια** (R. Tykva, J. Sabol, 1995) **υπάρχουν σχεδόν παντού και οποιοδήποτε υλικό περιέχει ορισμένες ποσότητες ίχνους ραδιενεργών στοιχείων.** Από τα περίπου 2600 νουκλίδια, τα 300 είναι ραδιενεργά. Κάποιες φυσικές ουσίες, όπως τα βράχια, το έδαφος ή το νερό περιέχουν ενίοτε υψηλές συγκεντρώσεις των φυσικών ραδιονουκλιδίων που είναι επίγεια ή εξωγήινης προέλευσης, ωστόσο όμως οι συγκεντρώσεις αυτών των στοιχείων σε διαφορετικά δείγματα είναι αρκετά μεταβλητές. Εκτός από την φυσική ραδιενέργεια στο περιβάλλον μας, πολλά τεχνητά ραδιονουκλίδια είναι επίσης παρόντα σε μικρές ποσότητες, ενώ πέρα από την παρουσία τους στο περιβάλλον πολλά χρησιμοποιούνται συχνά ως ένα ευέλικτο μεθοδικό εργαλείο

σε πολλούς τομείς όπως η ιατρική ή οι επιστήμες της ζωής.

Οι ραδιενεργοί ρύποι σχετίζονται άμεσα με την πυρηνική ενέργεια που λειτουργεί με την επαγωγή της ενέργειας που προέρχεται από τη διάσπαση των ατόμων. Όταν κατά τη δεκαετία του 1960 άρχισε η ειρηνική εφαρμογή της πυρηνικής ενέργειας, η νέα πηγή ενέργειας χαρακτηρίστηκε οικολογικώς καθαρή και θεωρήθηκε φθηνότερη από τις άλλες επειδή απλά εκλύει ως ρύπο διοξείδιο του άνθρακα σε χαμηλές ή μηδενικές ποσότητες <sup>[7]</sup>. Οι εκπομπές είναι μεν μικρές, αλλά αυτό δεν σημαίνει ότι δεν συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ένας πυρηνικός αντιδραστήρας και οι βοηθητικές μονάδες του εκπέμπουν μεγαλύτερα ποσά θερμότητας στην ατμόσφαιρα από ότι ένα συμβατικό εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας ίσης ισχύος. Ακόμη και σε κατάσταση ομαλής λειτουργίας, οι αντιδραστήρες μπορεί να εκπέμπουν ραδιενεργά αέρια.

Το μεγάλο πρόβλημα της χρήσης της πυρηνικής ενέργειας ήταν και συνεχίζει να είναι, τα πυρηνικά απόβλητα που παράγονται ως αντίδραση από αυτήν. Τα πυρηνικά απόβλητα διακρίνονται σε απόβλητα χαμηλής, μεσαίας και υψηλής ραδιενέργειας, τα οποία ανάλογα με την κατηγορία τους πρέπει να φυλάσσονται για μερικές δεκάδες έως μερικές χιλιάδες χρόνια υπό ελεγχόμενες συνθήκες <sup>[8]</sup>. Τα απόβλητα αυτά είναι πιο επικίνδυνα από οποιοδήποτε άλλο είδος αποβλήτων και οι επιπτώσεις τους διαρκούν περισσότερο σε βάθος χρόνου, ενώ καμία χώρα μέχρι σήμερα δεν έχει εξεύρει ασφαλή τρόπο και τόπο για να αποθηκεύσει τα ραδιενεργά κατάλοιπα. Αυτή τη στιγμή καμία χώρα δεν διαθέτει χώρους εναπόθεσης των πυρηνικών αποβλήτων, καθώς το θάψιμο δεν θεωρείται μακροπρόθεσμη λύση, αφού δεν μπορεί να εξασφαλιστεί ένα θαμμένο φορτίο για εκατοντάδες ή και χιλιάδες χρόνια, δηλαδή όσο «ζούν» τα πυρηνικά απόβλητα.

Η ραδιενέργεια αποτελεί μια ακόμα σημαντική πηγή ακτινοβολίας και είναι μια ασταθής μορφή ενέργειας η οποία όμως επηρεάζει αρνητικά και άλλα στοιχεία. Ξεκινώντας να αναφέρουμε ότι ακτινοβολίες πάντα υπήρχαν στο περιβάλλον. Έρχονται από το διάστημα, τον Ήλιο και τα άλλα αστέρια, εκπέμπονται από τα ραδιενεργά στοιχεία που υπάρχουν στο έδαφος, ακόμη και στο ίδιο μας το σώμα. Το περιβάλλον που ζούμε είναι γεμάτο από ακτινοβολίες, είτε τις βλέπουμε είτε όχι. Οι ακτινοβολίες αυτές διαφέρουν ως προς την ενέργεια που έχουν και ανάλογα με την ενέργεια τους, είναι και η δράση τους, η



αλληλεπίδρασή τους με το περιβάλλον και τον άνθρωπο.

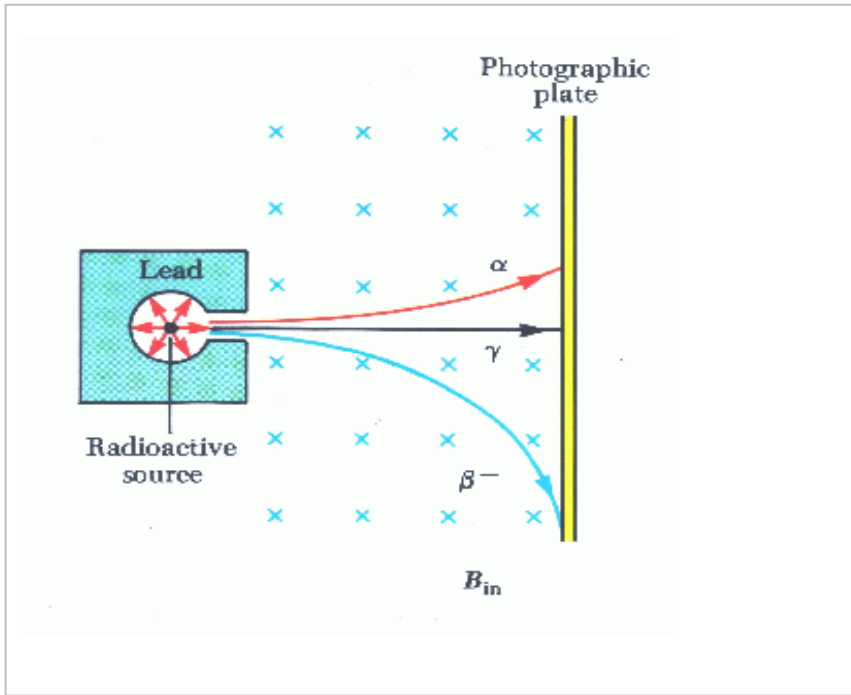
Η ραδιενέργεια συνίσταται σε **τρεις τύπους ακτινοβολίας**:

- ▶ τα *σωματίδια άλφα* (ή *ακτίνες άλφα*)
- ▶ τα *σωματίδια βήτα* (ή *ακτίνες βήτα*)
- ▶ την *ακτινοβολία γάμμα* (ή *ακτίνες γάμμα και ακτίνες Χ*).

Τα **σωματίδια άλφα** <sup>[9]</sup>, αποτελούνται από δυο πρωτόνια και δυο νετρόνια και μπορούν να σταματήσουν με κάτι τόσο απλό όσο ένα κομμάτι χαρτί ή το δέρμα του ανθρώπου αφού διαπερνούν μόνο μερικά χιλιοστά του εκατοστού το αλουμίνιο.

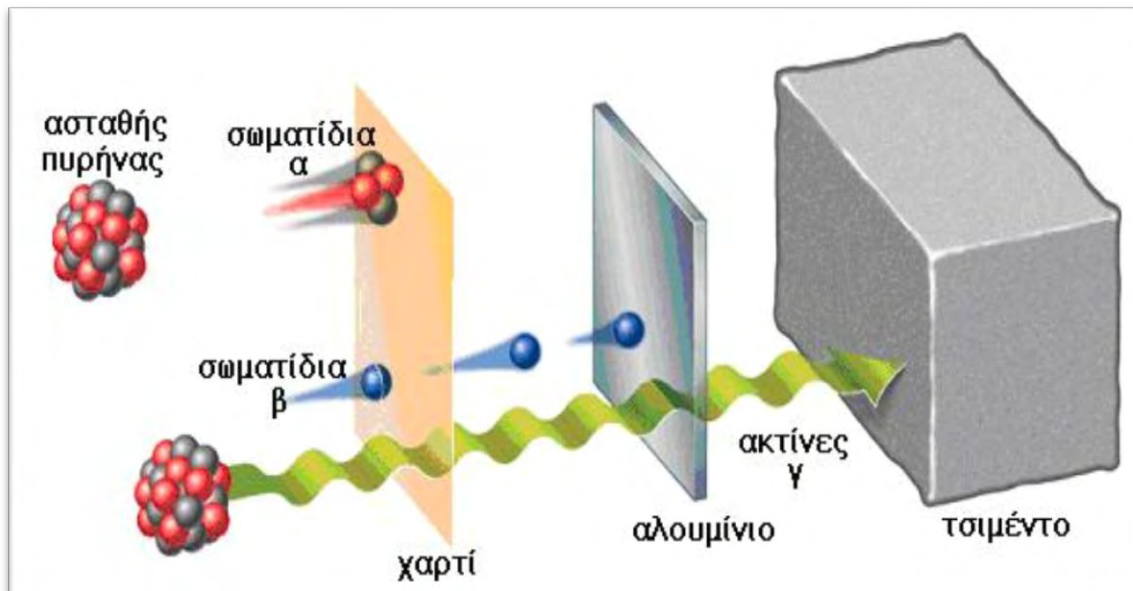
Τα **βήτα σωματίδια** είναι ηλεκτρόνια που δημιουργούνται όταν ένα νετρόνιο μετατρέπεται σε πρωτόνιο μέσα στον πυρήνα κάποιου ραδιοϊσότοπου. Είναι σε θέση να διαπεράσουν το ανθρώπινο δέρμα, το οποίο όμως μπορεί να προστατευτεί από αυτά με τη χρήση γυαλιού ή μετάλλου και είναι σχεδόν 100 φορές πιο διαπεραστικά από τα σωματίδια άλφα.

Οι **ακτίνες γάμμα**, είναι μια ορισμένη ποσότητα ενέργειας, συνήθως περιέχει την περισσότερη ενέργεια από τα προϊόντα της διάσπασης, που μεταδίδεται σαν κύμα και είναι το πιο επικίνδυνο είδος εκπομπών της ραδιενέργειας καθώς μπορούν να βλάψουν σημαντικά τον άνθρωπο και μπορεί να σταματήσουν μόνο από ένα πελώριο και ογκώδες κομμάτι σκυροδέματος.



Σχήμα 1.2. Ο διαχωρισμός της ακτινοβολίας μιας ραδιενεργού πηγής με χρήση μαγνητικού πεδίου.

(<http://ikee.lib.auth.gr/record/133606/files/GRI-2014-11656.pdf>)



Σχήμα. 1.3. Η διεισδυτική ικανότητα της ακτινοβολίας α, της ακτινοβολίας β και της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας γ.

([http://physiclessons.blogspot.gr/2012/05/blog-post\\_2506.html](http://physiclessons.blogspot.gr/2012/05/blog-post_2506.html))

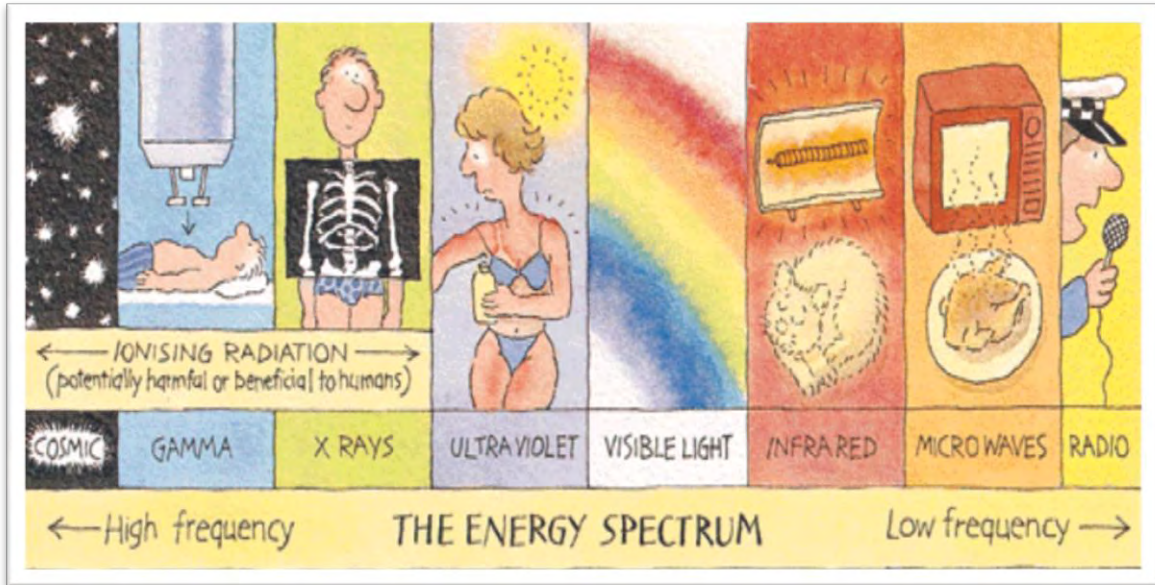
Η ακτινοβολία ταξιδεύει από την πηγή της με τη μορφή της ενέργειας κυμάτων ή από ενεργά σωματίδια <sup>[10]</sup>. Υπάρχουν δύο είδη ακτινοβολίας:

- η **ιονίζουσα ακτινοβολία**
- η **μη ιονίζουσα ακτινοβολία**

Η **ιονίζουσα ακτινοβολία** έχει τόση ενέργεια που μπορεί να προκαλέσει την απόσπαση των ηλεκτρονίων από άλλα άτομα δημιουργώντας ιόντα, μια διαδικασία γνωστή και ως ιονισμό. Ο ιονισμός ενεργοποιεί την παραγωγή ελευθέρων ριζών στα κύτταρα του ανθρωπίνου σώματος και μπορεί να προκαλέσει αλλαγές στην δομή του DNA στα γονίδια θέτοντας σε κίνδυνο την υγεία των οργανισμών. Ιονίζουσα ακτινοβολία αποτελούν οι υπεριώδεις υψηλής συχνότητας, τα ραδιενεργά στοιχεία και κοσμικά σωματίδια από το διάστημα, οι ακτίνες X και οι ακτίνες γ οι οποίες έχουν ευρύτατη εφαρμογή στην ιατρική, τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας αλλά και σε άλλους κλάδους της τεχνολογίας. Χρησιμοποιείται επίσης σε περιβαλλοντικές μελέτες, όπου μέσω των λεγόμενων ραδιοϊσοτοπικών δεικτών εξετάζεται η ρύπανση του νερού των ποταμών και των λιμνών, καθώς και η ρύπανση της ατμόσφαιρας από τις βιομηχανικές εκπομπές στην ατμόσφαιρα. Τέλος, χρησιμοποιείται για την τεχνητή μετάλλαξη στα φυτά με σκοπό την ανάπτυξη ανθεκτικότερων ειδών, καθώς και για την αποστείρωση ή συντήρηση ιατρικών προϊόντων, τροφίμων κ.α.

Η **μη ιονίζουσα ακτινοβολία** έχει αρκετή ενέργεια για να κινήσει τα άτομα γύρω από το μόριό τους ή να τα αναγκάσει να δονούνται, αλλά δεν αρκεί για να αφαιρέσει ηλεκτρόνια, είναι δηλαδή ακτινοβολίες με πολύ μικρό μήκος κύματος. Οι μη-ιονίζουσες ακτινοβολίες (Σ. Νταιλιάνης, Πάτρα 2014) αναφέρονται στην υπεριώδη ακτινοβολία UV που λαμβάνουμε από τον ήλιο, σε ακτίνες Laser (με μήκος κύματος 180-1000 nm), το ορατό φως, το υπεριώδες φως, σε ακτίνες radar, ραδιοκύματα και σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία. Άλλα παραδείγματα αυτού του είδους ακτινοβολίας είναι οι ακτινοβολίες χαμηλών συχνοτήτων στις οποίες περιλαμβάνονται οι ραδιοφωνικές, οι τηλεοπτικές, των επικοινωνιών (κινητής – σταθερής), των μικροκυμάτων (φούρνοι μικροκυμάτων), μέχρι και οι υπεριώδεις μικρής συχνότητας.

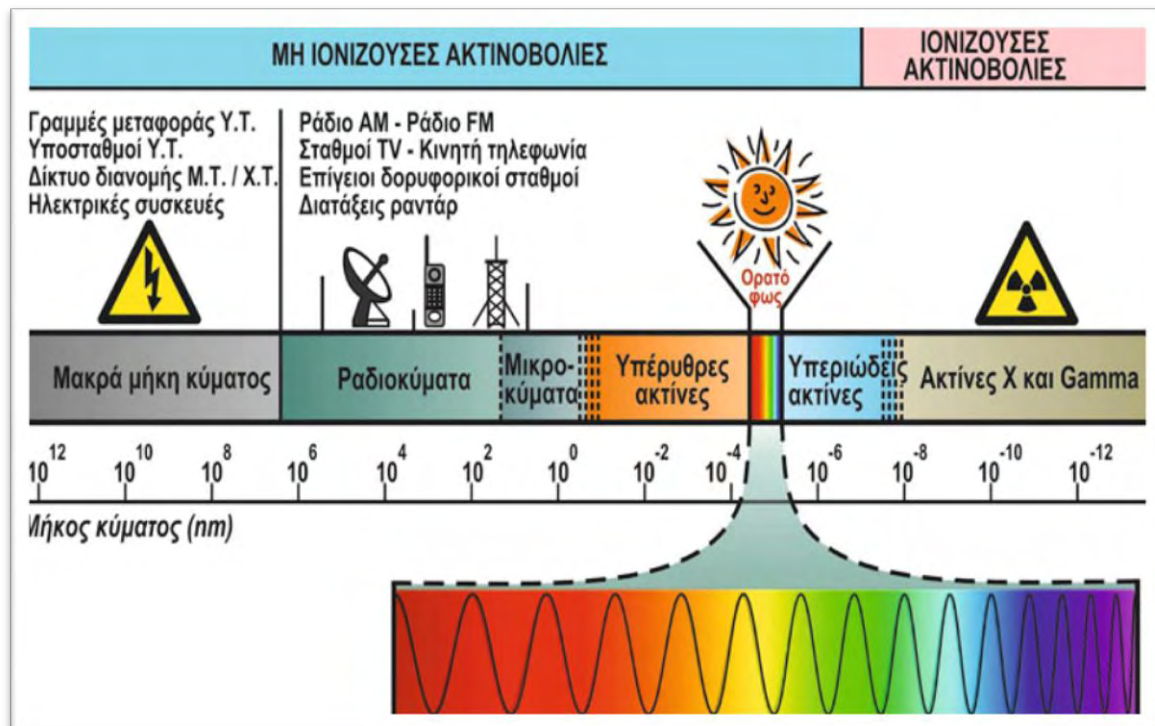
Εξ' αιτίας αυτών και της τεράστιας διάδοσής τους είναι δόκιμος ο όρος ηλεκτρομαγνητικό νέφος, το οποίο βρίσκεται σε σφικτό εναγκαλισμό με τον πλανήτη μας .



|.....Ιονίζουσα ακτινοβολία.....|..... Μη ιονίζουσα ακτινοβολία.....|

Σχήμα 1.4. Είδη ακτινοβολίας

([http://oldportal.demokritos.gr/parousiaseis/STAMATELATOS\\_210705.pdf](http://oldportal.demokritos.gr/parousiaseis/STAMATELATOS_210705.pdf))



Σχήμα 1.5. Παραδείγματα μη ιονίζουσας και ιονίζουσας ακτινοβολίας.

([http://ecogenia.blogspot.gr/2016/01/blog-post\\_30.html](http://ecogenia.blogspot.gr/2016/01/blog-post_30.html))

## 1.1 Ιστορική αναδρομή της ραδιενέργειας

Το φαινόμενο της ραδιενέργειας ανακαλύφθηκε τυχαία το 1896 από τον Γάλλο φυσικό Ανρί Μπεκερέλ <sup>[4]</sup>, ο οποίος παρατήρησε ότι τα ορυκτά του ουρανίου αλλά και άλλες ενώσεις του ουρανίου όπως το θειϊκό ουρανύλιο του καλίου, χωρίς καμία εξωτερική επίδραση εκπέμπουν ακτινοβολία που μοιάζει με τις ακτίνες Χ και προσβάλλει τη φωτογραφική πλάκα. Τις ίδιες ακτίνες, που αρχικά ονομάστηκαν “ακτίνες Μπεκερέλ” ή “ακτίνες ουρανίου”, εκπέμπουν και άλλες ενώσεις του ουρανίου. Η φύση της ακτινοβολίας αυτής ήταν άγνωστη στους επιστήμονες της εποχής και τάραξε τις τότε επικρατούσες αντιλήψεις στη φυσική διότι φαινομενικά ερχόταν σε αντίθεση με το θεμελιώδες αξίωμα της διατήρησης της ενέργειας. Οι ανακοινώσεις του Μπεκερέλ, διέγειραν το ενδιαφέρον ενός νεαρού ζεύγους φυσικών, του Πιέρ και της Μαρίας Κιουρί και μετά από συστηματικές μελέτες του φαινομένου διαπιστώθηκε πως δε συνέβαινε κάτι τέτοιο.

Το 1898 το ζεύγος Κιουρί στην προσπάθειά τους να διερευνήσουν το μυστήριο της νέας ακτινοβολίας και ενώ εργάζονταν με τον ορυκτό πισσουρανίτη, ανακάλυψαν ότι και άλλες ορυκτές ουσίες εκπέμπουν ίδιας μορφής ακτινοβολίας εκμεταλλευόμενοι την ιδιότητα των εκπεμπόμενων ακτινών να καθιστούν αγώγιμο τον αέρα. Βρήκαν εκτός από το καθαρό μέταλλο ουράνιο και ένα ακόμη ορυκτό το ράδιο, το οποίο είναι ραδιενεργό σε μεγαλύτερο βαθμό από το ουράνιο, καθώς και άλλες ουσίες όπως το πολώνιο και έτσι αποδείχτηκε ότι η νέα ακτινοβολία δεν είναι αποτέλεσμα ιδιομορφίας ενός υλικού αλλά συνδέεται άμεσα με τους χαρακτήρες μιας ολόκληρης οικογένειας στοιχείων.

Η Μαρία Κιουρί πρότεινε να ονομάσουν “ραδιενέργεια” την ιδιότητα εκπομπής ακτινοβολιών και “ραδιενεργά” τα σώματα που την έχουν. Οι Κιουρί μοιράστηκαν με τον Μπεκερέλ το βραβείο Νόμπελ της Φυσικής το 1903 ενώ η Μαρία Κιουρί πήρε ξανά το βραβείο Νόμπελ της Χημείας το 1911 για την ανακάλυψη των ραδιενεργών στοιχείων ραδίου και πολωνίου. Το τελευταίο πήρε το όνομά του προς τιμήν της Πολωνίας, γενέτειρα της Μαρίας Κιουρί και χημικά συγγενεύει με το Βισμούθιο. Υπήρξε έτσι η μόνη που τιμήθηκε δυο φορές με τη μεγαλύτερη διάκριση στον επιστημονικό κόσμο.



Σχήμα 1.1.1. Μαρί Κιουρί  
(<https://boraeinai.blogspot.gr/2016/01/marie-curie.html>)

Στη συνέχεια το ζεύγος Κιουρί με τη συνεργασία του Μπεμόντ πέτυχε την απομόνωση μετά από συστηματικές ανακρυσταλλώσεις μιας δεύτερης ουσίας, εξίσου ραδιενεργή με το ράδιο, η οποία συγγενεύει προς το Βάριο και απομονώθηκε με τη μορφή χλωριούχου και βρωμιούχου άλατος. Αργότερα ο Ντεμπιέρν απομόνωσε από τον πρισουρανίτη και τρίτη ραδιενεργή ουσία η οποία συγγενεύει με το Θόριο και την ονόμασε ακτίνιο, ενώ τις ακτινοβολίες από τις ενώσεις του θορίου μελέτησε επισταμένως ο βαρόνος Έρνεστ Ράδερφορντ. Ο ίδιος το 1899 διέκρινε τα άλφα και βήτα σωματίδια, ενώ τον επόμενο χρόνο ο Πάουλ Βίλαρντ (Paul Villard) ανακάλυψε και περιέγραψε τις ακτίνες γάμμα που εκπέμπονται από το ράδιο. Το 1902 οι Ράδερφορντ και Σόντντ αντελήφθησαν τελικά ότι η πηγή της εκπεμπόμενης ενέργειας είναι η μερική διάσπαση των ατόμων κατά την οποία εκσφενδονίζεται τεμάχιο του πυρήνα τους με μεγάλη ταχύτητα, μεταστοιχειούμενο σε άλλο άτομο.

Πολύ σύντομα μετά την ανακάλυψη της τεχνητής ραδιενέργειας, οι επιστήμονες άρχισαν να βομβαρδίζουν σχεδόν κάθε στοιχείο του περιοδικού συστήματος με επιταχυντές πρωτονίων, δευτερονίων και σωματιδίων άλφα.

Με αυτό τον τρόπο υπήρξαν σε θέση να παράγουν και να εντοπίσουν εκατοντάδες νέα ραδιονουκλίδια. Η χρήση των ηλεκτρονίων γραμμικού επιταχυντή παρέχει την πρόσθετη δυνατότητα παραγωγής νέων ραδιονουκλιδίων.

Σειρά από επιστήμονες <sup>[11]</sup> με τις έρευνες τους απέδειξαν ότι τα ραδιενεργά στοιχεία εκπέμπουν τρεις τύπους ακτινοβολιών, τις ακτινοβολίες άλφα, βήτα και γάμμα, οι οποίες είναι ανεξάρτητες και δεν επηρεάζονται από εξωτερικούς παράγοντες ή χημικές αιτίες. Τα πορίσματα αυτά συμπεραίνουν ότι η ραδιενέργεια είναι ιδιομορφία του εσωτερικού της ύλης και κυρίως της αστάθειας των πυρήνων, οι οποίοι παρουσιάζουν αυτόματη διάσπαση και εκπέμπουν τις χαρακτηριστικές ακτινοβολίες. Έτσι η ακτινοβολία α αποτελείται από πυρήνες του στοιχείου ηλίου, η ακτινοβολία β αποτελείται από ηλεκτρόνια των οποίων οι ταχύτητες πλησιάζουν την ταχύτητα του φωτός και η ακτινοβολία γ μοιάζει με τις ακτίνες Χ και αποτελείται από ηλεκτρομαγνητικά κύματα με μικρά μήκη κύματος.

Σήμερα εκτός των ραδιενεργών ουσιών που υπάρχουν στη φύση, κατορθώθηκε και η τεχνητή παρασκευή ραδιενεργών στοιχείων, με συνέπεια να διακρίνουμε τη ραδιενέργεια σε φυσική και σε τεχνητή. Η αυτόματη διάσπαση αναφέρεται ως φυσική ραδιενέργεια ενώ η διάσπαση μετά από βομβαρδισμό αναφέρεται ως τεχνητή ραδιενέργεια η οποία προέρχεται από τεχνητά παρασκευασμένα ραδιοϊσότοπα.



Σχήμα 1.1.2. Οι συτελεστές της ανακάλυψης της ραδιενέργειας (<http://www.aboutcancer.com/history.htm>)

# ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

## 2 Δομή του πυρήνα – Αποδιέγερση του πυρήνα

Η ύλη αποτελείται από στοιχεία όπως το υδρογόνο, το οξυγόνο, ο άνθρακας, ο σίδηρος. Τα στοιχεία αποτελούνται από άτομα, τα οποία περιέχουν έναν μικροσκοπικό πυρήνα και ηλεκτρόνια <sup>[12]</sup>. Οι βασικοί λίθοι του πυρήνα είναι το πρωτόνιο (p) με θετικό ηλεκτρικό φορτίο (+e) και το νετρόνιο (n) που δεν έχει καθόλου φορτίο. Τα ηλεκτρόνια έχουν αρνητικό φορτίο (-e) και περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα. Ο περισσότερος χώρος ενός ατόμου είναι άδειος.

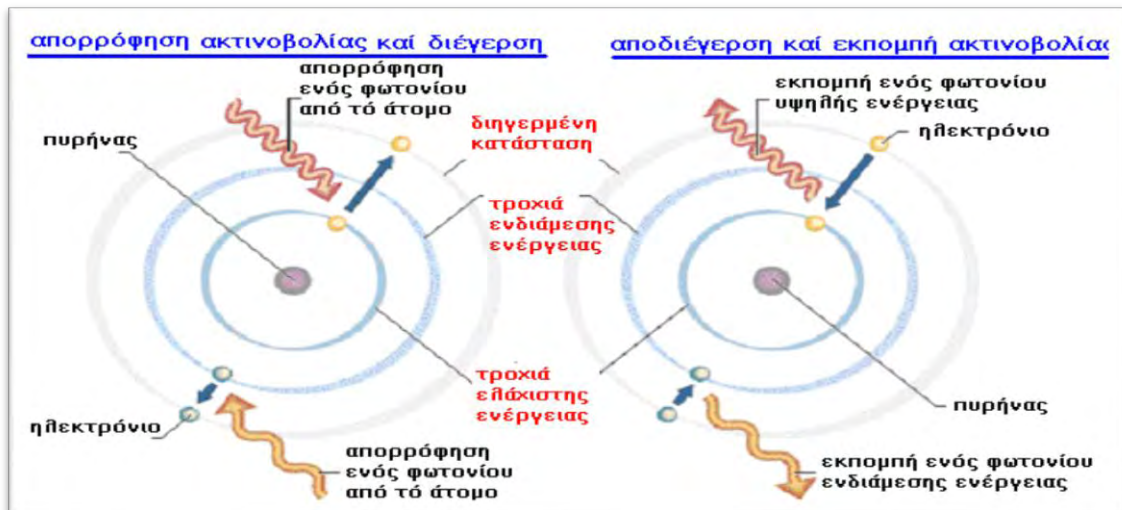
Σε ένα ουδέτερο ηλεκτρικά άτομο, ο ολικός αριθμός των πρωτονίων (ατομικός αριθμός Z) είναι ίσος με τον αριθμό των ηλεκτρονίων. Ο συνολικός αριθμός των νετρονίων (νετρονικός αριθμός N) και των πρωτονίων ονομάζεται μαζικός αριθμός A, δηλαδή:  $A = Z + N$ . Κάθε ξεχωριστό είδος πυρήνα ονομάζεται νουκλίδιο <sup>[11]</sup>. Οι πυρήνες ενός στοιχείου με τον ίδιο ατομικό αριθμό Z αλλά διαφορετικό αριθμό νετρονίων N, ονομάζονται ισότοπα του στοιχείου. Έχουν τις ίδιες χημικές ιδιότητες άρα και το ίδιο σύμβολο αλλά διαφορετική μάζα. Αν σε ένα στοιχείο αλλάξει ο ατομικός αριθμός Z, τότε αλλάζει και το ίδιο το στοιχείο, φαινόμενο το οποίο ονομάζεται μεταστοιχείωση. Το κάθε νουκλίδιο παριστάνεται από το σύμβολο του αντίστοιχου στοιχείου X με ένα δείκτη κάτω αριστερά ίσο με Z και ένα δείκτη πάνω αριστερά ίσο με A ( ${}^A_ZX$ ).

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μάζες πρωτονίου και νετρονίου είναι σχεδόν ίσες, ενώ η μάζα του ηλεκτρονίου είναι 1836 περίπου φορές μικρότερη από τη μάζα ενός νουκλεονίου (p ή n). Σε ένα άτομο δηλαδή όλη η μάζα του είναι συγκεντρωμένη στον πυρήνα που έχει διάμετρο 100.000 φορές περίπου μικρότερη από τη διάμετρο ολόκληρου του ατόμου. Τα πρωτόνια και τα νετρόνια κρατούνται δέσμια στον πυρήνα υπό την επίδραση της ισχυρής πυρηνικής δύναμης, η οποία δρα μεταξύ όλων των πυρηνικών σωματιδίων και υπερνικά τις ηλεκτρικές απώσεις των πρωτονίων. Πρόκειται για ισχυρές δυνάμεις μικρής εμβέλειας (1-2 fm=φεμτομέτρων), η επίδραση των οποίων είναι η ίδια τόσο για τα πρωτόνια όσο και για τα νετρόνια.



Αν ωστόσο, ο πυρήνας ενός στοιχείου είναι υπερβολικά μεγάλος δηλαδή ( $A > 209$  ή  $Z > 83$ ) οι απωστικές ηλεκτρικές δυνάμεις υπερσχύουν των ελκτικών πυρηνικών δυνάμεων και ο πυρήνας διασπάται. Ο ασταθής πυρήνας που διασπάται ονομάζεται *μητρικός*, ενώ ο πυρήνας που προκύπτει είναι ο *θυγατρικός* πυρήνας. Όταν για κάποιο λόγο, π.χ. επίδραση ακτινοβολίας, ή κρούση με άλλο σωματίδιο, ένα ηλεκτρόνιο εγκαταλείπει την τροχιά του και μεταβαίνει σε άλλη τροχιά υψηλότερης ενεργειακής στάθμης, όπως λέμε, προσλαμβάνοντας ενέργεια, τότε το άτομο διεγείρεται. Στην κατάσταση αυτή το άτομο δεν παραμένει επί πολύ, αλλά επανέρχεται στην προηγούμενη σταθερή κατάσταση (αποδιέγερση) ενώ το ηλεκτρόνιο επιστρέφει στην τροχιά του δίνοντας την ενέργεια που προσέλαβε προηγουμένως. Η απόδοση της ενέργειας αυτής γίνεται με την μορφή ενός φωτονίου. Τα φωτόνια αυτά, που δραπετεύουν κατά κάποιο τρόπο από τα άτομα, συνιστούν αυτό που αντιλαμβανόμαστε ως ακτινοβολία. Έτσι γεννιούνται τα δομικά συστατικά της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, δηλαδή τα φωτόνια.

Ανάλογα μάλιστα με την ενέργεια που αποδίδεται στο αποβαλλόμενο φωτόνιο, αυτό αντιστοιχεί σε ορισμένη συχνότητα ή μήκος κύματος. Εάν το ηλεκτρόνιο δεν επιστρέψει στην αρχική του τροχιά, αλλά με την ενέργεια που προσέλαβε καταφέρει να εγκαταλείψει το άτομο, τότε λέμε ότι το άτομο ιονίζεται, μετατρέπεται σε θετικό ιόν, (αφού πλεονάζουν πλέον τα θετικά φορτία των πρωτονίων) και το φαινόμενο ονομάζεται ιονισμός. Κατά τον ιονισμό δηλαδή αλλάζει ουσιαστικά η δομή της ύλης και αυτό φυσικά έχει τις επιπτώσεις του στα κύτταρα των οργανισμών.



Σχήμα 2.1. η διέγερση ενός ατόμου με επίδραση (απορρόφηση) φωτονίων και η αποδιέγερση με την εκπομπή φωτονίων.

(<http://users.sch.gr/xtsamis/OkosmosMas/Aktinovolies/Aktinovolies.htm>)

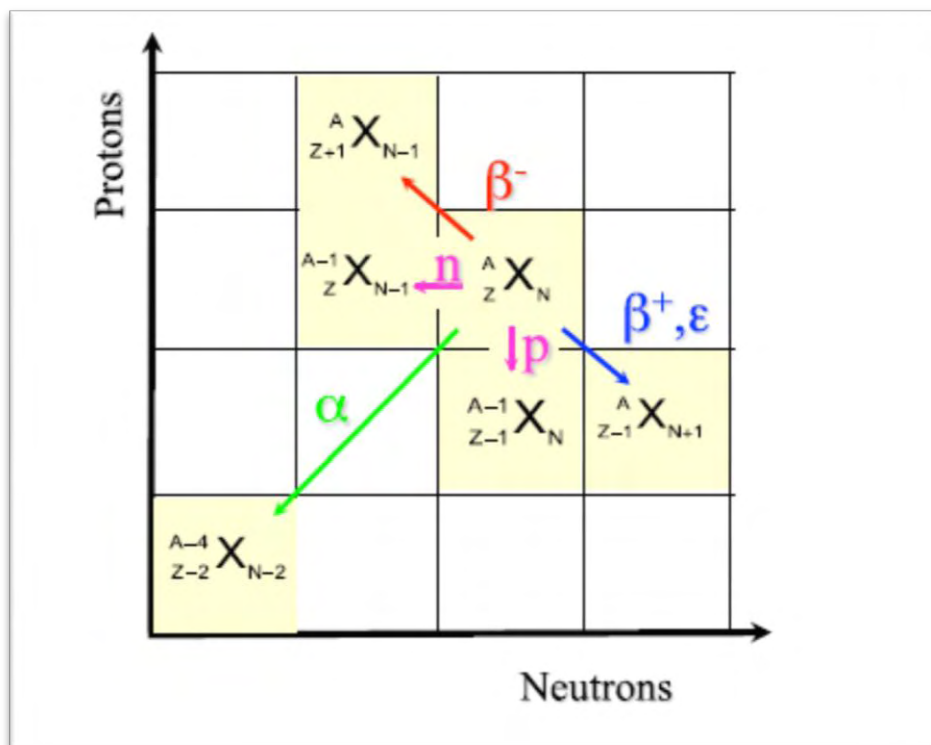
Ένα ραδιενεργό στοιχείο μεταστοιχειώνεται με εκπομπή α ή β ακτινοβολίας, που σχεδόν πάντα συνοδεύεται και από εκπομπή ακτινοβολίας γ. Στην α-διάσπαση, ο θυγατρικός πυρήνας έχει μαζικό αριθμό κατά 4 μονάδες μικρότερο και ατομικό αριθμό κατά 2 μονάδες μικρότερο. Στη β ακτινοβολία ο ατομικός αριθμός στον θυγατρικό πυρήνα αλλάζει κατά 1 μονάδα σε σχέση με το μητρικό, ενώ ο μαζικός αριθμός παραμένει αμετάβλητος. Στη γ ακτινοβολία, μαζικός και ατομικός αριθμός δε μεταβάλλονται.

Όταν ένας ραδιενεργός πυρήνας διασπάται, ο θυγατρικός πυρήνας μπορεί να είναι και αυτός ασταθής, οπότε συμβαίνει μια σειρά διαδοχικών διασπάσεων μέχρι να επιτευχθεί ένας σταθερός σχηματισμός. Παράδειγμα αποτελεί το ραδιενεργό στοιχείο ουράνιο  $^{238}\text{U}$  που βρίσκεται στη γη στη μεγαλύτερη αφθονία και το οποίο υπόκειται σε μια σειρά 14 διασπάσεων, 8 εκπομπές α και 6 β, καταλήγοντας στο σταθερό ισότοπο του μολύβδου  $^{206}\text{Pb}$ .

## 2.1 Ραδιενεργές διασπάσεις

Τα άτομα των ραδιενεργών στοιχείων φέρουν ασταθείς πυρήνες οι οποίοι έχουν πολλή ενέργεια, δηλαδή αυτό σημαίνει ότι μπορούν να διασπαστούν αυθόρμητα απελευθερώνοντας πυρηνική ακτινοβολία. Η ακτινοβολία συνίσταται σε σωματίδια άλφα - α, σωματίδια βήτα - β, ακτινοβολία γάμμα - γ και ακτίνες Χ. Η ακτινοβολία γάμμα φέρει συνήθως την περισσότερη ενέργεια από τα προϊόντα των ραδιενεργών διασπάσεων, τα οποία είναι επικίνδυνα για την ισορροπία της λειτουργίας του ανθρώπινου οργανισμού.

Ο πυρήνας του ατόμου του ραδιενεργού στοιχείου εκπέμποντας ακτίνες α ή β μετασχηματίζεται, δηλαδή υφίσταται αλλαγή στον ατομικό του αριθμό, οπότε ο πυρήνας που εξέπεμψε το σωματίδιο άλφα ή βήτα μετατρέπεται σε πυρήνα κάποιου άλλου χημικού στοιχείου.

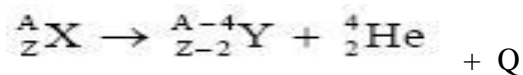


Σχήμα 2.3. Ραδιενεργές διασπάσεις.

([http://skiathos.physics.auth.gr/atlas/Nuclear\\_Physics/2010/Decays.pdf](http://skiathos.physics.auth.gr/atlas/Nuclear_Physics/2010/Decays.pdf))

### 2.1.1 Διάσπαση με εκπομπή σωματιδίων α

**Διάσπαση άλφα** - α ονομάζεται η μεταστοιχείωση ενός πυρήνα όταν αυτός εκπέμπει ένα σωματίδιο α, το οποίο αποτελείται από δυο νετρόνια και δυο πρωτόνια ισχυρά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Τα άλφα σωματίδια <sup>[13]</sup>, τα οποία είναι όμοια με τον πυρήνα του Ηλίου (<sup>4</sup>He), έχουν μαζικό αριθμό 4 και ηλεκτρικό φορτίο +2 και εκπέμπονται από τους ασταθείς πυρήνες κατά την α-διάσπαση. Στην αντίδραση αυτή ο ατομικός αριθμός του ατόμου ελαττώνεται κατά δυο εξαιτίας της απομάκρυνσης δυο πρωτονίων, ενώ ο μαζικός αριθμός ελαττώνεται κατά τέσσερα.



όπου X ο μητρικός πυρήνας, Y ο θυγατρικός πυρήνας και Q η ενέργεια της αντίδρασης. Είναι προφανές ότι για να είναι δυνατό να γίνει αυθόρμητα μία τέτοια αντίδραση πρέπει  $Q > 0$ , να είναι δηλαδή εξώθερμη.

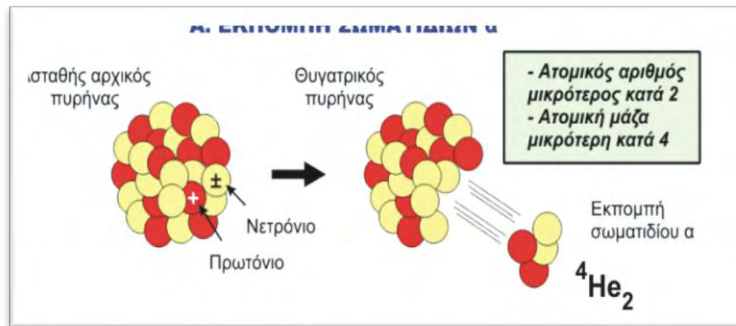
Έχει χαμηλή διαπεραστική ισχύ και είναι μικρού βεληνεκούς (μερικά εκατοστά στον αέρα). Τα πιο ενεργητικά α σωματίδια θα αποτύχουν γενικά να διαπεράσουν τα νεκρά στρώματα κυττάρων που καλύπτουν το δέρμα και μπορούν εύκολα να σταματήσουν βάζοντας μπροστά τους απλά ένα φύλλο χαρτιού. Ωστόσο, εάν η ακτινοβολία α που εκπέμπουν τα υλικά ληφθεί εσωτερικά με την αναπνοή, την τροφή ή το ποτό, ακτινοβολούνται άμεσα οι εσωτερικοί ιστοί και ως εκ τούτου προκαλούνται βιολογικές βλάβες.

#### α- διάσπαση

- Εκπομπή πυρήνων ηλίου
- $Z \rightarrow Z-2$
- $N \rightarrow N-2$
- $A \rightarrow A-4$

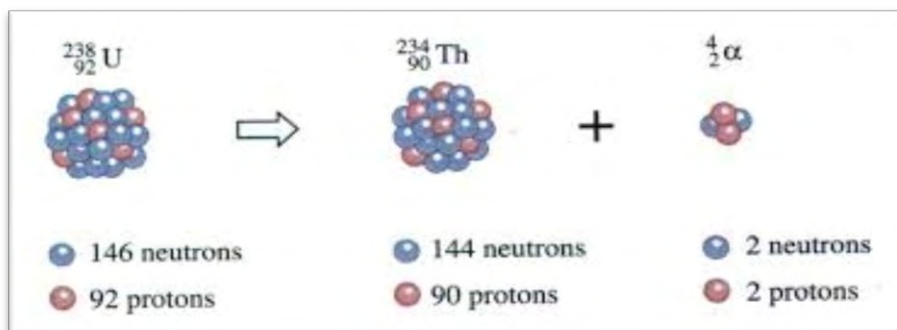
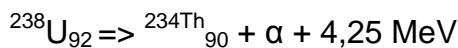
Όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια των άλφα σωματιδίων, τόσο μικρότερος ο χρόνος ημιζωής του ραδιονουκλιδίου και αντιστρόφως ανάλογα <sup>[14]</sup>.

Επειδή τα ραδιοϊσότοπα που εκπέμπουν σωματίδια άλφα ανήκουν σε στοιχεία με μεγάλο ατομικό αριθμό που χαρακτηρίζονται από σημαντική τοξικότητα, δεν χρησιμοποιούνται σε βιολογικά συστήματα, παρουσιάζουν όμως ενδιαφέρον λόγω του βιολογικού κινδύνου που προκαλούν, όπως Ra, Po, Pu κ.ά.



Σχήμα 2.1.1. Διάσπαση με εκπομπή α σωματιδίων.  
(<http://www.geo.auth.gr/106/theory/radioactivity.htm>)

Χαρακτηριστικό παράδειγμα η διάσπαση:



Σχήμα 2.1.2. Διάσπαση με εκπομπή α σωματιδίων.  
([http://www.aua.gr/~bethanis/radioactivity\\_alpha\\_beta\\_gama\\_radiation.pdf](http://www.aua.gr/~bethanis/radioactivity_alpha_beta_gama_radiation.pdf))

## 2.1.2 Διάσπαση με εκπομπή σωματιδίων β

**Διάσπαση βήτα - β** είναι μια πυρηνική αντίδραση η οποία γίνεται με την ασθενή αλληλεπίδραση και κατά την οποία ένας ατομικός πυρήνας μεταστοιχείωνεται σε έναν άλλο ή με αυξημένο κατά ένα τον ατομικό αριθμό και εκπέμποντας ένα σωματίο β<sup>-</sup>, δηλαδή ένα ηλεκτρόνιο, οπότε και η διάσπαση παίρνει το όνομα *διάσπαση β<sup>-</sup>* ή με μειωμένο κατά ένα τον ατομικό αριθμό και εκπέμποντας ένα σωματίο β<sup>+</sup>, δηλαδή ένα ποζιτρόνιο οπότε και η διάσπαση λέγεται *διάσπαση β<sup>+</sup>*. Υπάρχει και η *διάσπαση ββ* στην οποία γίνεται εκπομπή δυο σωματιδίων β ταυτόχρονα και της σύλληψης e<sup>-</sup> στην οποία γίνεται σύλληψη ενός τροχιακού ηλεκτρονίου. Σε όλες τις αντιδράσεις ο μαζικός αριθμός του πυρήνα παραμένει σταθερός.

Τα σωματίδια βήτα είναι επικίνδυνα κυρίως όταν γίνεται κατάποση τους μέσω του φαγητού ή εισπνοή τους μέσω του αέρα και μπορούν να θωρακιστούν με κάποιο λεπτό φύλλο μετάλλου (π.χ. αλουμίνιο) <sup>[15]</sup>.

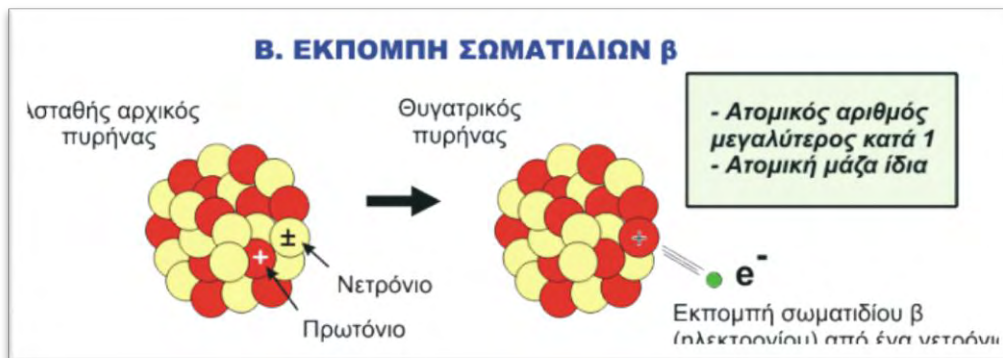
### **β<sup>-</sup> - διάσπαση**

- Εκπομπή e<sup>-</sup> και  $\bar{\nu}$
- $Z \rightarrow Z+1$
- $N \rightarrow N-1$
- $A = \text{const}$

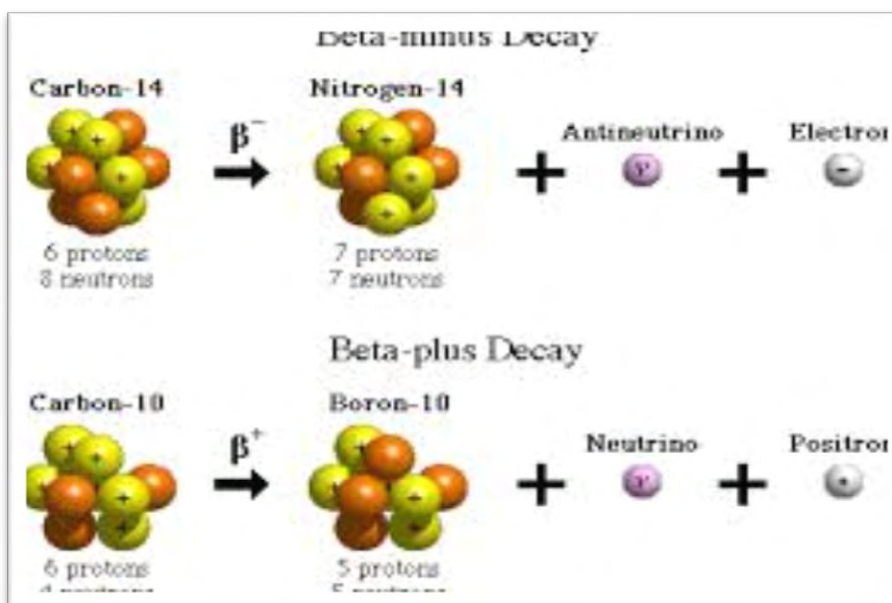
### **β<sup>+</sup> - διάσπαση**

- Εκπομπή e<sup>+</sup> και  $\bar{\nu}$
- $Z \rightarrow Z-1$
- $N \rightarrow N+1$
- $A = \text{const}$

Τα σωματίδια βήτα <sup>[16]</sup> είναι ηλεκτρόνια με μικρή μάζα, 7000 φορές περίπου ελαφρύτερη από αυτή των σωματιδίων άλφα και φέρουν μικρό σχετικά ηλεκτρικό φορτία +1 ή -1 (τα θετικά ηλεκτρόνια καλούνται ποζιτρόνια).

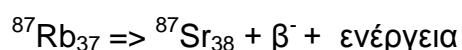


Σχήμα 2.1.3. Διάσπαση με εκπομπή β σωματιδίων.  
(<http://www.geo.auth.gr/106/theory/radioactivity.htm>)



Σχήμα 2.1.4. Παράδειγμα διάσπασης με εκπομπή β<sup>-</sup> και β<sup>+</sup> σωματιδίων.  
(<http://blogs.sch.gr/12gympet/tag/%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%AF%CE%BD%CE%B5%CF%82-%CE%B1/>)

Παράδειγμα β-διάσπασης είναι η μετατροπή:

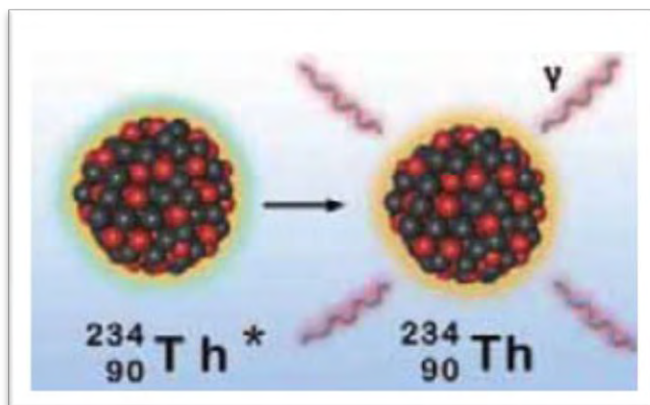
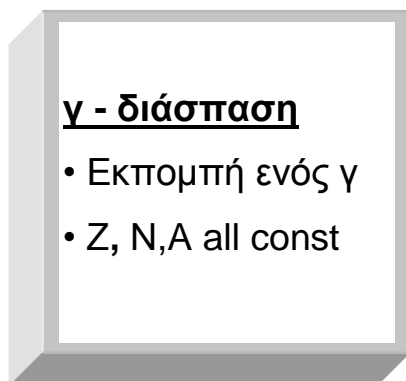


### 2.1.3 Διάσπαση με ακτινοβολία $\gamma$ και ακτίνες X

Κατά τη μετάβαση ενός πυρήνα από κάποια ενεργειακή στάθμη διέγερσης σε κάποια άλλη χαμηλότερη, εκπέμπεται ένα φωτόνιο ενέργειας ίσης με τη διαφορά των δυο σταθμών (0,1 ως 10 MeV περίπου). Αυτή η μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ονομάζεται **ακτινοβολία γάμμα**.

Επισημαίνεται ότι η ενέργεια των φωτονίων γάμμα που εκπέμπονται από τον πυρήνα είναι εκατομμύρια φορές μεγαλύτερη από την ενέργεια των ακτίνων X που εκπέμπονται από το άτομο κατά τη μετάπτωση ηλεκτρονίων από υψηλότερη σε χαμηλότερη στάθμη. Το ίδιο ισχύει και για την ενέργεια και των άλλων σωματιδίων που εκπέμπονται από τον πυρήνα.

Η ακτινοβολία γάμμα και οι ακτίνες X έχουν μεγάλη διεισδυτικότητα και μπορούν να ταξιδέψουν αρκετά μέτρα στον αέρα και θωρακίζονται δύσκολα με συγκεκριμένο πάχος τσιμέντου, μόλυβδου, χάλυβα κ.α.



Σχήμα 2.1.5. Παράδειγμα διάσπασης με ακτινοβολία  $\gamma$ .  
(<http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGYM-C201/296/2071,7286/>)



Η **ακτινοβολία Χ** είναι και αυτή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (φωτόνια) υψηλής ενέργειας, της ίδιας φύσης με την ακτινοβολία γάμμα και παρουσιάζει τις ίδιες βασικές φυσικές ιδιότητες σε ό,τι αφορά τη διεισδυτικότητά της. Οι ακτίνες Χ εκπέμπονται από διεργασίες έξω από τον πυρήνα, ενώ οι ακτίνες γάμμα προέρχονται μέσα από τον πυρήνα. Παράγεται στις ηλεκτρονικές στιβάδες των ατόμων (χαρακτηριστική ατομική ακτινοβολία), ή σε στόχους επιβράδυνσης ταχέως κινουμένων φορτισμένων σωματιδίων (ακτινοβολία πέδησης) σε ειδικές για το σκοπό αυτό διατάξεις (λυχνίες ακτίνων Χ, επιταχυντές σωματίων).



Σχήμα 2.1.6. Τα σωματίδια άλφα, βήτα και γάμμα και η διέλευση τους μέσα από ομογενές ηλεκτρικό πεδίο

(<http://www.slideshare.net/NikitasVougiouklis/ss-54615238>)

## ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΟΙ ΡΥΠΟΙ

### 3 Τι είναι οι ραδιενεργοί ρύποι

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ραδιενέργεια είναι το φαινόμενο της εκπομπής σωματιδίων ή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τους πυρήνες ορισμένων χημικών στοιχείων που ονομάζονται ραδιενεργά στοιχεία. Μέχρι τώρα γνωρίζουμε περίπου 2600 νουκλίδια, από τα οποία λιγότερα από 300 είναι ραδιενεργά, τα 260 είναι σταθερά νουκλίδια, περίπου 80 από αυτά έχουν βρεθεί στη φύση, τα 25 είναι μεγάλης διάρκειας ζωής φυσικά ραδιονουκλίδια και περισσότερα από 2300 είναι τεχνητά ραδιονουκλίδια (R. Tykva, J. Sabol, 1995). Οι **ραδιενεργοί ρύποι (ή ραδιονουκλίδια)** είναι επικίνδυνοι όχι λόγω των χημικών τους ιδιοτήτων αλλά κυρίως λόγω της ραδιενέργειας που εκπέμπουν κατά τη μεταστοιχείωσή τους. Τα ραδιενεργά υλικά ή ουσίες μπορεί να αποτελούνται από ένα ή περισσότερα ραδιονουκλίδια.

Ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι πρώτο συστατικό του οικοσυστήματος μέσα στο οποίο η ρύπανση μπορεί να διαδοθεί σε αποστάσεις χιλιάδων χιλιομέτρων και αποτελεί το μέσο διάδοσης της διασυνοριακής ρύπανσης σε άλλες περιοχές μακριά ή κοντά. Οι εκπομπές στην ατμόσφαιρα είναι υπεύθυνες για τις αλλαγές που έχουν εκδηλωθεί σε πλανητική πλέον κλίμακα, με σοβαρές συνέπειες στα χερσαία και υδάτινα οικοσυστήματα. Η εισπνοή του ραδιενεργά μολυσμένου αέρα είναι πολύ πιο επικίνδυνη από την μολυσμένη με ραδιενέργεια τροφή για τον άνθρωπο αλλά και τα ζώα, προκαλώντας ακόμα και το θάνατο.

Στη φύση υπάρχουν αρκετά ραδιενεργά στοιχεία, από τα οποία τα πιο γνωστά είναι το ουράνιο, το θόριο και το ραδόνιο. Το τελευταίο καθώς και τα θυγατρικά του ραδονίου (Po-218, Pb-214, Bi-214 και Po-214), είναι το πιο σύνηθες αέριο ευδιάλυτο στο νερό. Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν παραχθεί μερικές εκατοντάδες τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων, τα οποία περιλαμβάνουν τα γνωστά κάισιο-137 και στρόνιο-90. Επίσης κάποια από τα κυριότερα ραδιενεργά ισότοπα που εκλύονται στο περιβάλλον έπειτα από ένα πυρηνικό ατύχημα είναι τα  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$ . Συγκεντρωτικά όλα τα φυσικά εμφανιζόμενα ισότοπα πάνω από το βισμούθιο στον περιοδικό πίνακα είναι

ραδιενεργά.

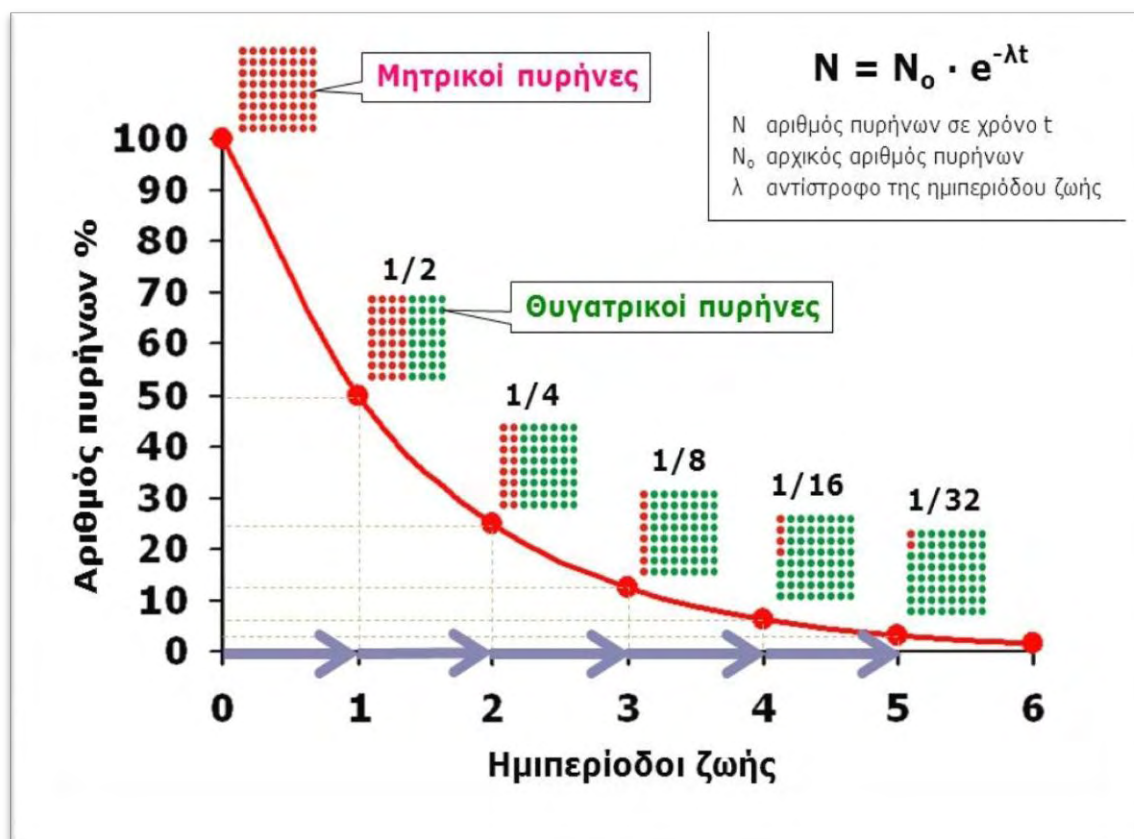
Ένα χαρακτηριστικό πολλών ραδιενεργών υλικών είναι ο **μεγάλος χρόνος ημιζωής (half life)** δηλαδή **το διάστημα που απαιτείται για ένα ραδιενεργό στοιχείο να χάσει το 50% της ενέργειας του** <sup>[17]</sup>. Από τον ορισμό γίνεται προφανές ότι ο κίνδυνος που διατρέχουμε από την επαφή μας με ένα ραδιενεργό στοιχείο μειώνεται μεν, αλλά καθόλου δεν εξαφανίζεται μετά το πέρας του χρόνου ημιζωής του. Παραδείγματος χάριν, αν ένα ισότοπο έχει χρόνο ημιζωής μία εβδομάδα, δεν σημαίνει ότι αυτό είναι ακίνδυνο ύστερα από μία εβδομάδα. Σημαίνει μόνο ότι ύστερα από μία εβδομάδα τα ποσά ραδιενέργειας που εκπέμπει είναι τα μισά της αρχικής. Χρειάζεται άλλη μία εβδομάδα για να φθάσουμε στο ένα τέταρτο της αρχικής και ούτω καθεξής. Ωστόσο, ραδιενεργά στοιχεία με μεγάλο χρόνο ημιζωής (π.χ. 700 εκατομμύρια χρόνια το ουράνιο-235) έχουν πολύ αργό ρυθμό εξασθένησης υποβάλλοντας μας σε αμελητέα ραδιενέργεια, σε σχέση με αυτή που λαμβάνουμε από τη φύση ή το ίδιο μας το σώμα (π.χ. το κάλιο-40 στο σώμα μας έχει χρόνο ημιζωής τα 1400 εκατομμύρια χρόνια). Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα του πλουτωνίου-239, το οποίο έχει χρόνο ημιζωής 24.000 χρόνια. Θα απαιτηθούν 240.000 χρόνια (10 χρόνια ημιζωής) για να απομείνει το 0,1% της αρχικής ραδιενέργειας και 720.000 χρόνια (30 χρόνια ημιζωής) για να θεωρηθεί ασφαλής μια περιοχή που μολύνθηκε με αυτό. Αντίθετα ραδιενεργά στοιχεία με πολύ μικρότερους χρόνους ημιζωής (που συνήθως εκλύονται στην ατμόσφαιρα από τα πυρηνικά ατυχήματα), εκπέμπουν περισσότερη ακτινοβολία σε μικρότερο διάστημα και επιβαρύνουν περισσότερο τα κύτταρα συγκεκριμένων οργάνων. Μικρότερους χρόνους ζωής (της τάξης των min, s, ms, μs ή και μικρότερων) έχει επίσης ένα μεγάλο ποσοστό των τεχνητών ραδιονουκλιδίων.

Ο χρόνος ημιζωής ουσιαστικά είναι το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η πιθανότητα επιβίωσης ενός συγκεκριμένου ραδιενεργού ατόμου είναι ακριβώς στο μισό και δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}}$$

Όπου  $T_{1/2}$  είναι ο χρόνος ημιζωής.

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$



Σχήμα 3.1. Ημιπερίοδος ζωής.  
[\(http://slideplayer.gr/slide/2636340/\)](http://slideplayer.gr/slide/2636340/)



Σχήμα 3.2. Αλυσίδα μεταστοιχείωσης του ουρανίου U-238.

### 3.1 Που βρίσκονται οι ραδιενεργοί ρύποι

Η έκθεσή μας σε ακτινοβολία είναι συνεχής και καθημερινή καθώς οτιδήποτε συναντάμε στην καθημερινή μας ζωή περιέχει κάποιο ραδιενεργό υλικό. Καθώς τα επιμέρους ραδιονουκλίδια διαφέρουν στο σύστημα αποσύνθεσής τους και τα σωματίδια που εκπέμπονται καθώς και στις ενέργειές τους, δεν υπάρχει καθολική μέθοδος για την ακριβή μέτρηση όλων των ραδιενεργών πηγών. Επιπλέον, υπάρχει συνήθως ένα μίγμα ραδιονουκλιδίων σε ένα δείγμα και αυτό προκαλεί πάντα κάποιες δυσκολίες στην αξιολόγηση ενός δεδομένου ραδιονουκλιδίου. Η κύρια ποσότητα (R. Tykva, J. Sabol, 1995) που χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση των ραδιενεργών πηγών είναι η "δραστηριότητα", η οποία ορίζεται ως πηλίκο του αριθμού των ραδιενεργών μετασχηματισμών σε ένα ραδιονουκλίδιο  $dN$  και το χρονικό διάστημα  $dt$  στον οποίο αυτοί οι μετασχηματισμοί εμφανίστηκαν, δηλαδή:

$$A = \frac{dN}{dt}$$

Η δραστηριότητα μιας ποσότητας ενός ραδιονουκλιδίου είναι αριθμητικά ίση με την τιμή απόσβεσης αυτού του ραδιονουκλιδίου και δίνεται από την ακόλουθη θεμελιώδη νόμο της ραδιενέργειας.

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

όπου το  $N$  είναι ο αριθμός των ραδιενεργών πυρήνων και το  $\lambda$  είναι η σταθερά διάσπασης.

Μια ραδιενεργή πηγή μπορεί μερικές φορές μπορεί να θεωρηθεί ως μια σημειακή πηγή της οποίας οι διαστάσεις είναι αρκετά μικρές ώστε να μπορεί να αγνοηθεί. Όμως, οι πηγές έχουν διαφορετικά μεγέθη, σχήματα και μορφές και έτσι αρκετά συχνά άλλες ποσότητες που προέρχονται από "δραστηριότητα" μπορεί να είναι πιο χρήσιμες.

Οι πηγές ακτινοβολίας που προκαλούν τη μεγαλύτερη έκθεση του γενικού κοινού, δεν είναι κατ' ανάγκη αυτές που προσελκύουν την περισσότερη προσοχή.

Οι πηγές των ραδιενεργών ρύπων στο περιβάλλον είναι:

- **φυσικές**
- **ανθρωπογενείς**

Ανέκαθεν το φυσικό περιβάλλον του ανθρώπου ήταν και εξακολουθεί να είναι περιβάλλον ραδιενεργού ακτινοβολίας και όλοι οι ζωντανοί οργανισμοί είναι συνεχώς εκτεθειμένοι στους ραδιενεργούς ρύπους. Η **φυσική ακτινοβολία** έχει κοσμική προέλευση και προέρχεται από τον συνεχή βομβαρδισμό της γης με ιονίζοντα σωματίδια από το διάστημα και από τον ήλιο, ενώ η γήινη ακτινοβολία προέρχεται από τα ραδιενεργά στοιχεία στο φλοιό της γης σε ποσοστό 8% και οι δυο αντίστοιχα <sup>[17]</sup>. Σε αυτό συνέβαλλαν και οι δραστηριότητες του ανθρώπου, οι οποίες αύξησαν κατά πολύ τη ραδιενεργό ακτινοβολία που δέχεται το περιβάλλον, με βασική δραστηριότητα την κατασκευή της κατοικίας με υλικά από τη γη όπως η λάσπη και η πέτρα. Οι **ανθρωπογενείς πηγές** ραδιενεργών ρύπων είναι ουσιαστικά τα προϊόντα της ανθρώπινης τεχνολογίας και των πυρηνικών ατυχημάτων, τα μηχανήματα παραγωγής ακτινοβολιών όπως για παράδειγμα τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται σε ιατρικές εφαρμογές, οι λαμπτήρες, τα ραντάρ, οι κεραίες κ.α..

Επίσης, οι πηγές των ραδιενεργών ρύπων διακρίνονται σε:

- **εξωτερικές**
- **εσωτερικές**

**Εξωτερικές** <sup>[18]</sup> είναι οι πηγές ακτινοβολίας που βρίσκονται έξω από το σώμα του ανθρώπου, όπως είναι η κοσμική ακτινοβολία η οποία προέρχεται από το διάστημα και από τον ήλιο καθώς και άλλες άγνωστες αστρικές πηγές, τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα στην επιφάνεια της γης και τα τεχνητά ραδιοϊσότοπα που έχουν πέσει στο έδαφος, στα οικοδομικά υλικά και στον αέρα.

Οι **εσωτερικές** ως προς το σώμα πηγές είναι τα ραδιενεργά στοιχεία, φυσικά ή τεχνητά, που εισέρχονται από το περιβάλλον στο ανθρώπινο σώμα μέσω της τροφικής αλυσίδας, του δέρματος, του αμφιβληστροειδούς των ματιών ή της αναπνοής και αποθηκεύονται ή κυκλοφορούν προτού αποβληθούν από το σώμα στα οστά, στους ιστούς, στο αίμα κ.λπ. και από την εκάστοτε θέση τους ακτινοβολούν τα κύτταρα του σώματος. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα του καλίου ( $K-40$ ), ενός μετάλλου απαραίτητου σε κάθε οργανισμό. Μάλιστα το μεγαλύτερο ποσοστό της έκθεσης σε φυσική ακτινοβολία οφείλεται στην εισπνοή των ραδιοστοιχείων που παράγονται από το ραδιενεργό αέριο ραδόνιο που αναβλύζεται από διάφορα σημεία του εδάφους σε ποσοστό 55%, έχοντας ετήσια έκθεση από 0,2-10 mSv και μέση τιμή 1,26 mSv.

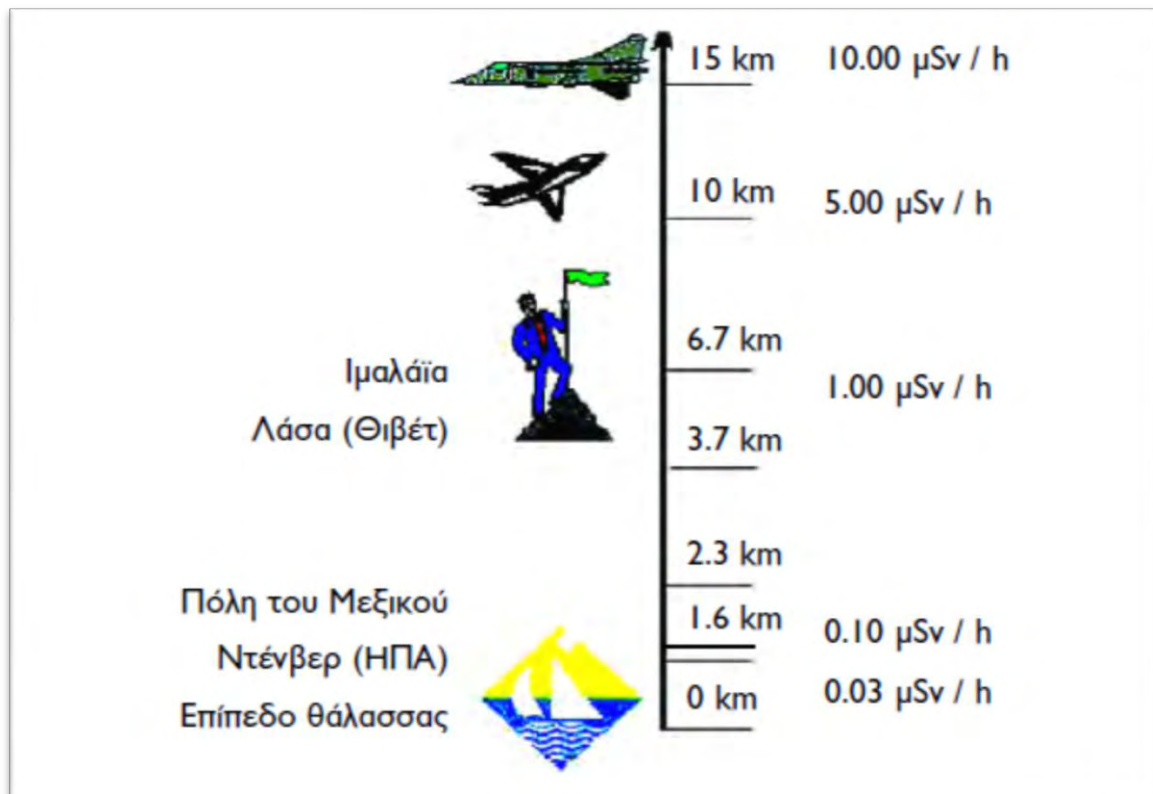
Από τις κύριες φυσικές πηγές εξωτερικής ακτινοβολίας του ανθρώπου, είναι τα μακρόβια (μεγάλοι χρόνοι ημιζωής) φυσικά ραδιενεργά στοιχεία του ραδίου, του ουρανίου, του θορίου, του καλίου κ.ά, που είναι συστατικά του φλοιού της γης από την πρώτη στιγμή της δημιουργίας της. Συναντώνται παντού, στο έδαφος, στο νερό, στον αέρα, στους ζωντανούς οργανισμούς, στις τροφές και στα οικοδομικά υλικά. Η **ακτινοβολία του εδάφους** σε δεδομένη θέση εξαρτάται άμεσα από τη γεωλογική σύσταση των πετρωμάτων της περιοχής. Είναι προφανές ότι σε υπόγειους χώρους όπως είναι τα σπήλαια, οι ιαματικές πηγές, τα ορυχεία, τα υπόγεια των κτιρίων, η εξωτερική ακτινοβολία του ανθρώπου από φυσικά ραδιενεργά στοιχεία είναι αυξημένη σε σχέση με την αντίστοιχη ακτινοβολία σε υπέργειους χώρους, με την ετήσια έκθεση να κυμαίνεται από 0,3-1 mSv και μέση τιμή 0,48 mSv.

Η υψηλής ενέργειας ακτινοβολία που έρχεται από το διάστημα ονομάζεται **κοσμική**. Έχει προέλευση τον ήλιο καθώς και άλλες αστρικές πηγές. Αύξηση της κοσμικής ακτινοβολίας έχουμε κατά τις εξάρσεις της ηλιακής δραστηριότητας. Κατά την είσοδό της στην ατμόσφαιρα, προκαλούνται επίσης και πυρηνικές αντιδράσεις που οδηγούν στην παραγωγή ελαφρών ραδιενεργών πυρήνων όπως Ηλίου-3, Βηρυλίου-7, Άνθρακα-14, Νατρίου-22 κ.λπ. Η κοσμική ακτινοβολία κατά τη διέλευσή της μέσα από τα στρώματα της γήινης ατμόσφαιρας απορροφάται μερικώς και η έντασή της μειώνεται σταδιακά με αποτέλεσμα να φτάνει στο επίπεδο της επιφάνειας της θάλασσας σχετικά εξασθενημένη, με ετήσια έκθεση 0,3-1 mSv και μέση τιμή 0,39 mSv. Ο μέσος



ρυθμός δόσης από την κοσμική ακτινοβολία στην επιφάνεια της θάλασσας είναι περίπου 0.03  $\mu\text{Sv/h}$  και αυξάνει με το υψόμετρο, διπλασιαζόμενος περίπου για κάθε 1500 μέτρα ύψος στην κατώτερη ατμόσφαιρα. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο όσοι ζουν σε υψηλό υψόμετρο, όπως στο Ντένβερ του Κολοραντο (υψόμετρο 5.280 πόδια) λαμβάνουν υψηλότερη ετήσια δόση ακτινοβολίας από την κοσμική ακτινοβολία από ό, τι κάποιος που ζει στο επίπεδο της θάλασσας (υψόμετρο 0 πόδια).

Το ιπτάμενο προσωπικό των αεροπορικών εταιρειών, ιδιαίτερα αυτό που ταξιδεύει σε υπερατλαντικές πτήσεις δέχεται σχετικά μεγαλύτερες ετήσιες δόσεις κοσμικής ακτινοβολίας και οι δόσεις αυτές πρέπει να παρακολουθούνται, να καταγράφονται και να ελέγχονται. Η κοσμική ακτινοβολία αποτελεί ένα σοβαρό περιοριστικό παράγοντα για την μακρόχρονη παραμονή των αστροναυτών στο διάστημα.



Σχήμα 3.1.1. Κοσμική ακτινοβολία και υψόμετρο.

([http://www.mlsi.gov.cy/mlsi/dli/dliup.nsf/54A1073D52523AE8C2257E2D003AC810/\\$file/I\\_Aktinovolia\\_sti\\_zoi\\_mas.pdf](http://www.mlsi.gov.cy/mlsi/dli/dliup.nsf/54A1073D52523AE8C2257E2D003AC810/$file/I_Aktinovolia_sti_zoi_mas.pdf))

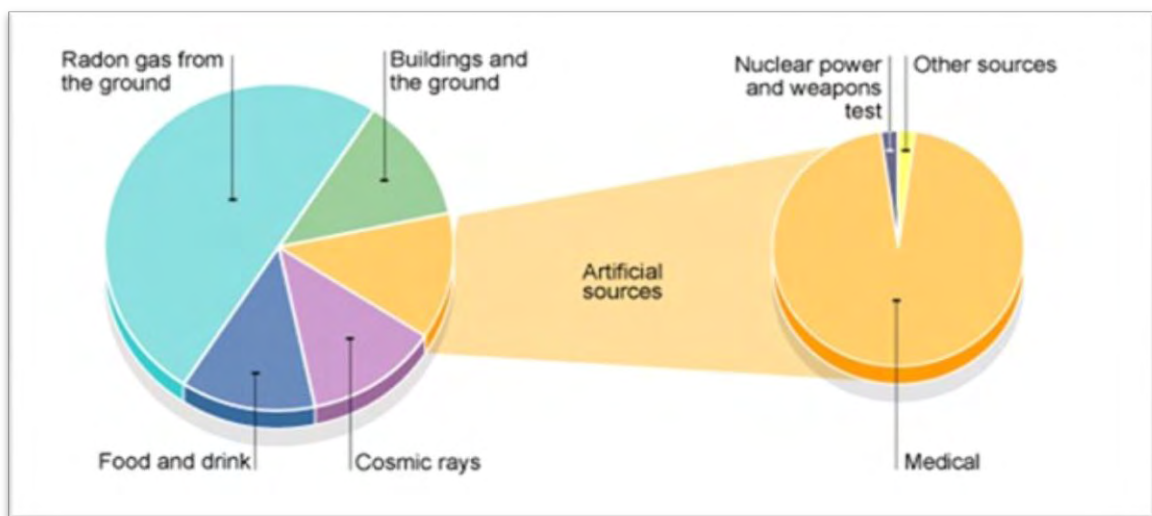
Σε μεγάλες **πυρηνικές εκρήξεις** (Tykva, Sabol, 1995) το μεγαλύτερο μέρος του ραδιενεργού υλικού φέρεται στη στρατόσφαιρα όπου ραδιονουκλίδια παραμένουν διεσπαρμένα για κάποιο χρονικό διάστημα και αργότερα εναποτίθενται σε όλο τον κόσμο. Κατά μέσο όρο, ο χρόνος παραμονής μπορεί να ποικίλει από λιγότερο από ένα χρόνο μέχρι περίπου πέντε χρόνια, ανάλογα με το υψόμετρο και το γεωγραφικό πλάτος. Μικρότερες εκρήξεις μεταφέρουν τα ραδιενεργά υλικά μόνο στην τροπόσφαιρα και νέφος εμφανίζεται μέσα σε λίγες μέρες ή εβδομάδες (UNSCEAR, 1988). Κάθε πυρηνική έκρηξη παράγει ένα τεράστιο ποσό διαφορετικών ραδιονουκλιδίων. Η πραγματική δραστηριότητα, ο τύπος καθώς και ο αριθμός των ραδιονουκλιδίων που απελευθερώνεται εξαρτάται από τον τύπο της πυρηνικής έκρηξης. Δύο είδη πυρηνικών αντιδράσεων μπορούν να παράγουν εξαιρετικά μεγάλες ποσότητες ενέργειας σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα: η αντίδραση σχάσης και η αντίδραση σύντηξης.

Η συνολική ραδιενέργεια που παράγεται από την αντίδραση σχάσης είναι πολύ υψηλότερη από τη ραδιενέργεια μετά την εκτόνωση των συσκευών θερμοπυρηνικής. Μια έκρηξη σχάσης ισοδύναμη με ένα κιλοτόνο TNT μπορεί να απελευθερώσει ραδιενεργό υλικό με τη συνολική δραστηριότητα των περίπου  $6 \cdot 10^{23}$  Bq, ενώ κατά τη διάρκεια της έκρηξης περισσότερα από 200 διαφορετικά ραδιονουκλίδια παράγονται των οποίων οι χρόνοι ημιζωής κυμαίνονται από ένα κλάσμα του δευτερολέπτου έως αρκετά εκατομμύρια χρόνια. Τα κύρια προϊόντα ενεργοποίησης που σχετίζονται με εκρήξεις σχάσης είναι  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  και  $^{55}\text{Fe}$ .

Όσον αφορά τους κινδύνους **λόγω ακτινοβολίας**, τα πιο σημαντικά συστατικά είναι τα  $^{90}\text{Sr}$  και  $^{137}\text{Cs}$  λόγω του μεγάλου χρόνου ημιζωής τους και την σχετικά υψηλή πρόσληψη από τα βιοσυστήματα. Το στρόντιο είναι χημικά πολύ παρόμοιο με το ασβέστιο το οποίο χρησιμοποιείται για τον σχηματισμό των οστών. Γι' αυτό το  $^{90}\text{Sr}$  επικεντρώνεται στα οστά. Ενώ το ραδιενεργό στρόντιο προσομοιώνει το ασβέστιο, η συμπεριφορά του καισίου είναι παρόμοια σε εκείνη του καλίου, ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία βιογενών.

Συνήθεις πηγές ραδιενεργών ρύπων <sup>[11]</sup> αποτελούν επίσης τα **δομικά υλικά** με αρκετά υψηλό ποσοστό ραδιενεργών υλικών όπως πάγκοι γρανίτη, τούβλα, τσιμέντο, ελαφρόπετρα, πέτρες από ηφαιστειακή τέφρα, φωσφογύψος (παραπροϊόν από τη διεργασία παραγωγής φωσφορικού λιπάσματος).

**Κεραμικά υλικά** (όπως πλακάκια ή γλάστρες) περιέχουν συχνά αυξημένες ποσότητες φυσικού ουρανίου, θορίου ή/και ποτασσίου. Σε πολλές περιπτώσεις η δράση τους περιορίζεται στην γυαλιστερή επιφάνεια και συνήθως μετρήσεις μεγαλύτερες αυτές του υποβάθρου είναι απίθανες, εκτός και αν μιλάμε για περιπτώσεις υψηλών συγκεντρώσεων. Παρόλα αυτά μερικά παλιά κεραμικά, προ 1960, ειδικά αυτά με πορτοκαλοκόκκινη στίλβωση (π.χ. Fiesta ware) είναι ραδιενεργά από ουράνιο. Θεωρείται όμως ασφαλές το να τρώει κανείς από αυτά τα κεραμικά.



Σχήμα 3.1.2. Φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές ραδιενέργειας  
[http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/science/add\\_aqa\\_pre\\_2011/radiation/back\\_groundradiationrev2.shtml](http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/science/add_aqa_pre_2011/radiation/back_groundradiationrev2.shtml)

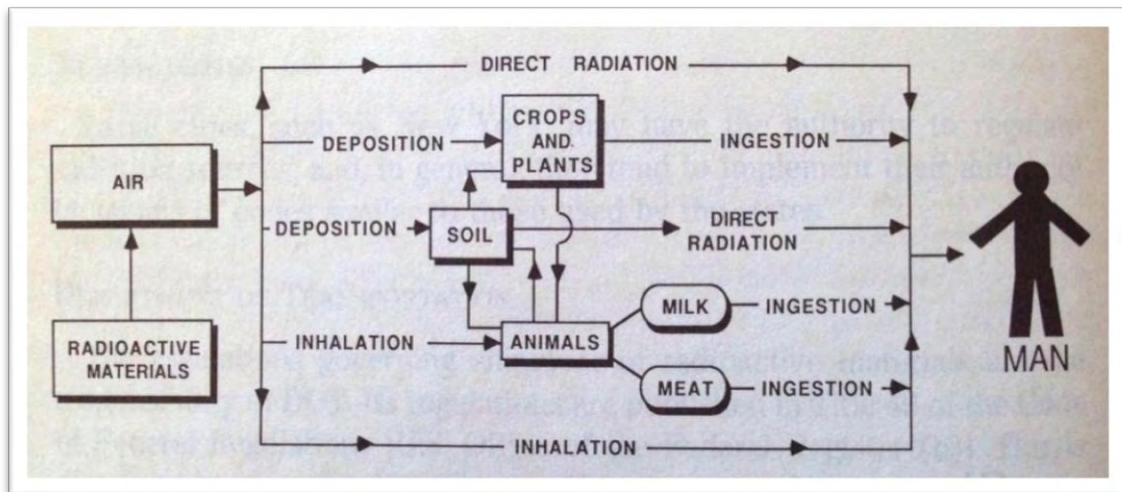
Πολλοί **οικιακοί ανιχνευτές καπνού** περιέχουν πηγή Αμερικού 241. Τα σωματίδια άλφα που εκπέμπονται από το Αμερικό ιονίζουν τον αέρα καθιστώντας τον αγώγιμο. Όταν σωματίδια καπνού εισέρχονται στην συσκευή ελαττώνουν το ρεύμα και ενεργοποιούν τον συναγερμό. Αυτές οι συσκευές σώζουν όμως πολλές ζωές κάθε χρόνο.

Οι **καινούργιες λάμπες εξοικονόμησης ενέργειας** περιέχουν μικρές ποσότητες Προμήθειου 147. Το μικρό σύρμα σε κάθε λάμπα περιέχει λιγότερο από 1μCi ραδιενεργού υλικού και είναι κάτω από το όριο ασφάλειας φυσικά. Ο λόγος για τον οποίο απαιτείται προσεκτικός χειρισμός των σπασμένων λαμπών είναι η ύπαρξη άλλων υλικών συμπεριλαμβανομένου και του υδράργυρου.

Ραδιενεργοί ρύποι περιλαμβάνονται και στα **σύγχρονα ρολόγια χειρός** καθώς χρησιμοποιούν μερικές φορές μικρές ποσότητες Υδρογόνου 3 (Τρίτιο) ή Προμήθειου 147 ως πηγές φωτός. Μερικά παλιότερα, πριν το 1970, χρησιμοποιούσαν Ράδιο 226 ως πηγή φωτός. Εάν αυτά τα παλιά ρολόγια ανοιχτούν με γυμνά χέρια είναι πιθανό να καταποθούν κάποιες ποσότητες Ραδίου, επομένως χρειάζεται προσοχή στον χειρισμό αυτών των ρολογιών.

Ραδιενεργούς ρύπους αποτελούν τα **απόβλητα βιομηχανιών, νοσοκομείων** (με εφαρμογές πυρηνικής ιατρικής) αλλά και **ακτινοδιαγνωστικών εργαστηρίων**. Οι ιοντίζουσες ακτινοβολίες παράγονται και χρησιμοποιούνται καθημερινά στην ιατρική για λόγους διάγνωσης και θεραπείας σε όλο τον κόσμο και ιδιαίτερα η χρήση των ακτίνων Χ, η οποία είναι η πιο κοινή εφαρμογή της ακτινοβολίας στην ιατρική. Οι διαγνωστικές εκθέσεις χαρακτηρίζονται από αρκετά χαμηλές δόσεις στους ασθενείς που είναι επαρκείς για να παρέχουν τις απαραίτητες κλινικές πληροφορίες, ενώ αντίθετα, οι θεραπευτικές εκθέσεις που κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται για τη θεραπεία του καρκίνου είναι λιγότερο συχνές και περιλαμβάνουν πολύ υψηλότερες δόσεις.

Τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα παράγονται επίσης **στους πυρηνικούς αντιδραστήρες (ισχύος ή πειραματικούς)** είτε ως προϊόντα των σχάσεων και των συνακολούθων διασπάσεων των πυρήνων, είτε μετά από ενσωματώσεις νετρονίων σε πυρήνες. Παράγονται σε επιταχυντές μετά από αντιδράσεις πυρήνων με φορτισμένα σωματίδια, ενώ ορισμένα από αυτά χρησιμοποιούνται στις ειρηνικές εφαρμογές της πυρηνικής τεχνολογίας στη βιομηχανία ή στη βιοϊατρική τεχνολογία.



Σχήμα 3.1.3. διάγραμμα πορείας των ραδιενεργών υλικών που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα και καταλήγουν στον άνθρωπο.  
(Merril Eisenbud, Environmental Radioactivity)

Επίσης, **φαγητά με ραδιενεργά κατάλοιπα** που για παράδειγμα παράγονται ή/και καταναλώνονται κοντά σε πυρηνικά εργοστάσια και αντιδραστήρες, ιδιαίτερα μετά από κάποιο πυρηνικό ατύχημα για το οποίο ενδεχομένως να μην είχε ενημερωθεί το κοινό ή να ενημερώθηκε πολύ καθυστερημένα, όπως έγινε με το ατύχημα του Τσερνόμπιλ.

Half-Life Group	Radionuclides	Application Fields
0.5 h–2.6 y	$^{34m}\text{Cl}$ , $^{38}\text{Cl}$ , $^{39}\text{Cl}$ , $^{18}\text{F}$ , $^{31}\text{Si}$ , $^{38}\text{S}$ , $^{24}\text{Na}$ , $^{28}\text{Mg}$	Cloud physics
days–years	$^{32}\text{P}$ , $^{33}\text{P}$ , $^7\text{Be}$ , $^{35}\text{S}$ , $^{22}\text{Na}$	Atmospheric structure, large-scale air circulation, and precipitation scavenging
> 10 y	$^{14}\text{C}$ $^3\text{H}$ , $^{32}\text{Si}$ , $^{39}\text{Ar}$ , $^{14}\text{C}$ , $^{36}\text{Cl}$ , $^{10}\text{Be}$ , $^{129}\text{I}$	Archeology and paleobotany Air-sea exchange, geochemical and biological cycles, paleomagnetic reversal records and cosmic ray prehistory
	$^{32}\text{Si}$ , $^{39}\text{Ar}$ , $^{14}\text{C}$ , $^{81}\text{Kr}$ , $^{36}\text{Cl}$ , $^{10}\text{B}$	Hydrology and glaciology: chronology of ground- waters, lacustrine sediments, and glaciers

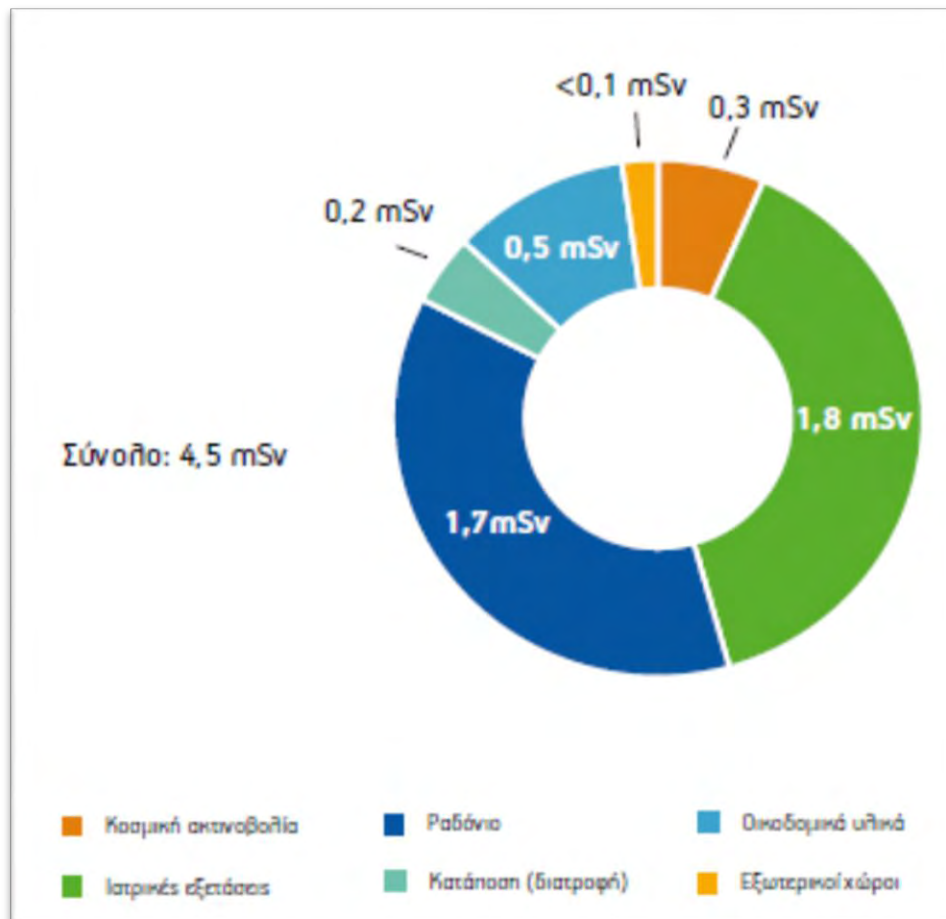
Σχήμα 3.1.4. κύρια ατμοσφαιρικά κοσμογενετικά ραδιονουκλίδια και οι εφαρμογές τους.

(Richard Tykva, Josef Sabol, Low-Level Environmental Radioactivity)

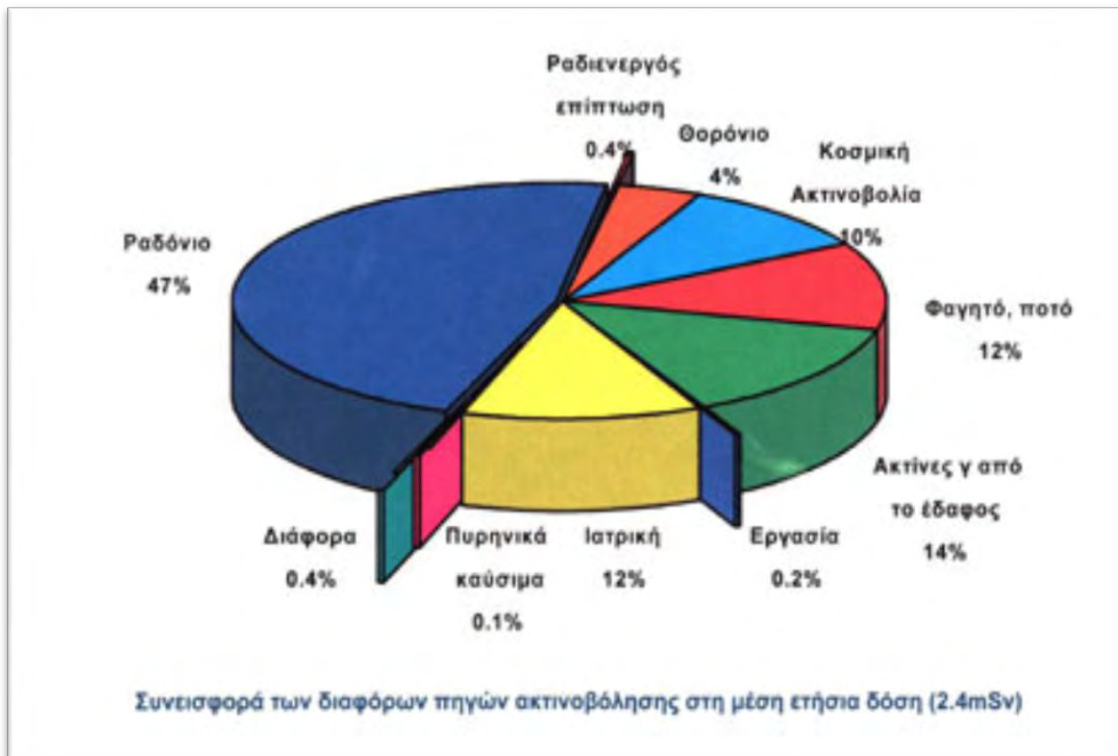
Τα εμπορικά **λιπάσματα** είναι σχεδιασμένα να παρέχουν Ποτάσσιο, Φώσφορο και Άζωτο. Αυτά τα λιπάσματα μπορεί να είναι ραδιενεργά μετρήσιμα για δύο λόγους: το Ποτάσσιο είναι φυσικά ραδιενεργό και ο Φώσφορος μπορεί να παραχθεί από ορυκτό Φωσφορικό άλας που περιέχει αυξημένα επίπεδα Ουρανίου και Ραδίου. Η ποσότητα της ραδιενέργειας που ενσωματώνεται στα φυτά δεν τα βλάπτει.

Οι κυριότερες οδοί **ραδιενεργού ρύπανσης των τροφίμων και των καλλιεργειών** <sup>[18]</sup> ήταν η άμεση εξωτερική ρύπανση από την ραδιενεργό εναπόθεση στους καρπούς ή η έμμεση από την ρύπανση άλλων τμημάτων των φυτών (κυρίως του φυλλώματος), καθώς και η ταχεία έμμεση ρύπανση του γάλακτος και του κρέατος των ζώων από την πρόσληψη ρυπασμένων ζωοτροφών. Μέσα από τις οδούς της τροφικής αλυσίδας ή την αναπνοή, τα φυσικά ραδιενεργά στοιχεία εισχωρούν στον οργανισμό, μεταβολίζονται, ορισμένα από αυτά αποθηκεύονται στους ιστούς και μετατρέπονται σε εσωτερικές πηγές ακτινοβολήσης, ενώ τα υπόλοιπα αποβάλλονται μετά από κάποιο χρόνο από τον οργανισμό του ανθρώπου με τα ούρα και τα κόπρανα ή την εκπνοή, με ετήσια έκθεση 0,2-1 mSv και μέση τιμή 0,29 mSv. Από τα στοιχεία αυτά, σημαντικό ρόλο στην εσωτερική ακτινοβολήση του σώματος παίζει το ραδιενεργό Κάλιο που βρίσκεται στα πετρώματα του εδάφους και υπάρχει σε όλες σχεδόν τις τροφές και τα ποτά. Το ίδιο συμβαίνει βέβαια και με όλα τα στοιχεία μέλη των ραδιενεργών οικογενειών που είναι φυσικά συστατικά του εδάφους. Για παράδειγμα, φυσικό ουράνιο συνυπάρχει στο μεταλλικό νερό, το κρασί, τον καφέ, το κρέας κ.λπ, ενώ πλούσια σε ουράνιο είναι και τα οστρακοειδή θαλασσινά.

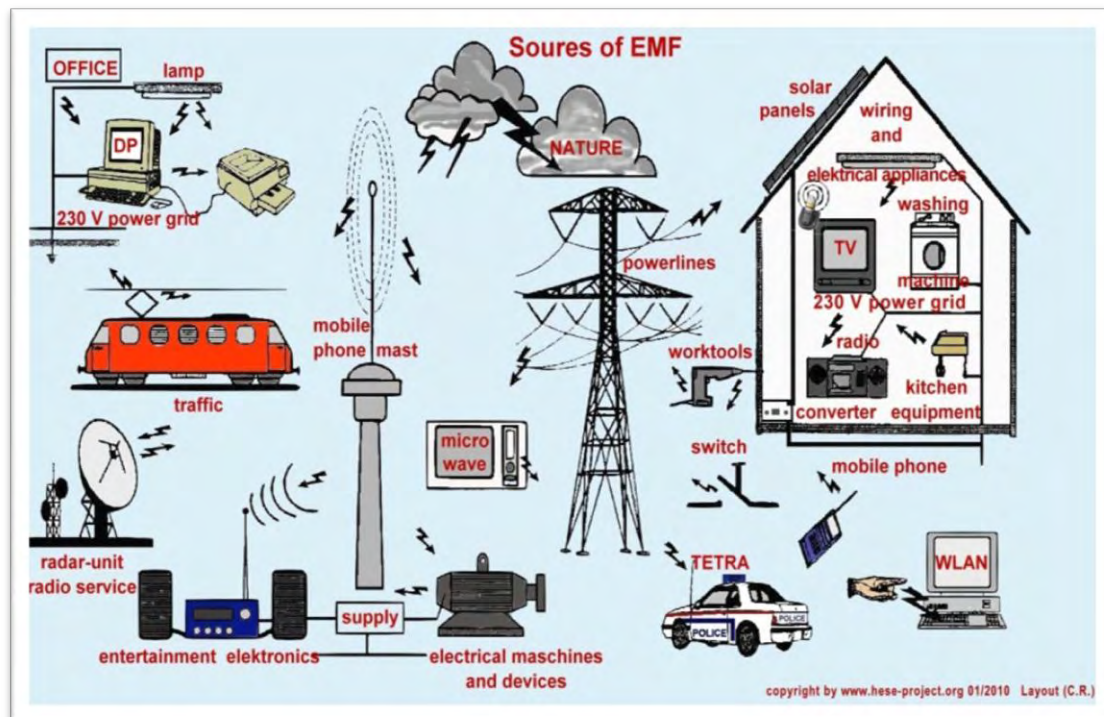
Συγκεκριμένα στην Ελλάδα μεγαλύτερη ραδιολογική σημασία είχε η άμεση ρύπανση των σιτηρών και των ζωοτροφών και μικρότερη αυτή των λαχανικών και των φρούτων.



Σχήμα 3.1.5. Πηγές έκθεσης σε ακτινοβολία στην Ελλάδα, (ΕΕΑΕ, annual report 2015)



Σχήμα 3.1.6. Ποσοστά εκπεμπόμενης ραδιενέργειας από τις διάφορες πηγές.  
<http://www.slideshare.net/NikitasVougiouklis/ss-54615238>



Σχήμα 3.1.7. Διάφορες πηγές εκπεμπόμενης ραδιενέργειας.  
[http://blogingr.blogspot.gr/2012/10/blog-post\\_31.html](http://blogingr.blogspot.gr/2012/10/blog-post_31.html)



### 3.2 Ποιοί είναι οι κυριότεροι ραδιενεργοί ρύποι

Στη φύση υπάρχουν περίπου **60 ραδιενεργοί πυρήνες και περίπου 1000 ραδιενεργά ισότοπα**. Σήμερα, στην καθημερινή μας ζωή, σε κάθε φυσικό στοιχείο (χρώμιο, αλουμίνιο, μόλυβδος, κάλιο, νάτριο, κ.α.) υπάρχει ένα πολύ μικρό ποσοστό το οποίο είναι ραδιενεργό, για παράδειγμα σε κάθε 1000 κιλά ορυκτού ουρανίου, τα 7 κιλά από αυτά είναι ραδιενεργά. Τα φυσικά ραδιενεργά κυμαίνονται σε ατομικούς αριθμούς  $81 < Z < 92$ , πλούσια σε νετρόνια, α ακτινοβολία, ενώ τα θυγατρικά είναι πιο πλούσια σε  $n, \beta$  ακτινοβολία. Θεωρώντας ότι κατά τη δημιουργία της γης (θεωρούμε την ηλικία του ηλιακού συστήματος  $\sim 10^{10}$  y), όλα τα ισότοπα ήταν σε ίσες ποσότητες, τα ισότοπα με μικρότερους χρόνους ζωής έχουν διασπαστεί <sup>[15]</sup>.

$$\frac{N_{235}}{N_{238}} = \frac{N_0 e^{-\lambda(235)t}}{N_0 e^{-\lambda(238)t}} = e^{(\lambda(238) - \lambda(235))t} = e^{-0.36t} = 0.0072 \Rightarrow t = 5.9 \cdot 10^9 \text{ y}$$

Οι συνέπειες από την έκθεση στην ιονίζουσα ακτινοβολία εξαρτώνται και από το είδος του ισότοπου. Ευγενή αέρια όπως το ξένο και το κρυπτόν δεν απορροφώνται από τον ανθρώπινο οργανισμό και θεωρούνται σχετικά ακίνδυνα <sup>[9]</sup>.

Αντιθέτως, για το ραδιενεργό ευγενές αέριο **ραδόνιο  $^{226}\text{Ra}$**  που προέρχεται από τη διάσπαση του ουρανίου που βρίσκεται στο φλοιό της γης και τα οικοδομικά υλικά και έχει χρόνο ημιζωής 1600 χρόνια. Το ραδόνιο αποτελεί σοβαρή απειλή για την υγεία διότι έχει την τάση να συγκεντρώνεται στο εσωτερικό των κατοικιών και συχνά σε πολύ μεγάλες ποσότητες. Από μετρήσεις, ο αέρας σε πολλές ευρωπαϊκές κατοικίες έχει ενεργότητα άνω των 200 Bq ανά κυβικό μέτρο, ενώ στην χώρα μας αφορά το 2% των κατοικιών <sup>[19]</sup>. Αποτελεί παγκοσμίως την κυριότερη πηγή έκθεσης που πληθυσμού σε ραδιενέργεια με το μεγαλύτερο μέρος της ετήσιας δόσης ακτινοβολίας που λαμβάνει ο οργανισμός μας και ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας αναφέρει ότι αποτελεί, μετά το κάπνισμα, τη δεύτερη σημαντικότερη αιτία του καρκίνου του πνεύμονα (η πιο κοινή αιτία θανάτου από καρκίνο) <sup>[11]</sup>. Προκαλεί μεταξύ 3% και

14% όλων των καρκίνων του πνεύμονα, ανάλογα με το μέσο επίπεδο ραδονίου σε μια χώρα. Όσο μικρότερη είναι η συγκέντρωση ραδονίου σε ένα σπίτι, τόσο χαμηλότερος είναι ο κίνδυνος, δεν υπάρχει όμως όριο κάτω από το οποίο η έκθεση σε ραδόνιο δεν φέρει κανένα κίνδυνο. Η πιθανότητα καρκίνου του πνεύμονα αυξάνεται κατά 16% για κάθε 100 Bq/m<sup>3</sup> αύξησης στη συγκέντρωση ραδονίου. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση ο καρκίνος του πνεύμονα είναι η πιο κοινή αιτία (περίπου 20%) θανάτου από καρκίνο. Με βάση επιδημιολογικές έρευνες σε εννέα χώρες της ΕΕ εκτιμήθηκε ότι περίπου το 9% των θανάτων από καρκίνο του πνεύμονα μπορεί να οφείλεται σε έκθεση σε ραδόνιο στο σπίτι και εκτιμάται ότι το 2006 περίπου 21.000 θάνατοι από καρκίνο του πνεύμονα οφείλονταν στην έκθεση σε ραδόνιο. Επίσης, κοντά σε κοντά σε καλώδια υψηλής ή μέσης τάσης, καθώς έρευνα του Πανεπιστημίου του Bristol έδειξε ότι η ύπαρξη υψηλών τιμών επιπέδων ακτινοβολιών χαμηλών συχνοτήτων αυξάνει μέχρι και 18 φορές την συσσώρευση των σωματιδίων ραδονίου στο χώρο.

Όλα τα **ισότοπα ουρανίου** <sup>223</sup>**U** είναι ελαφρώς ραδιενεργά. Το τελικό αποτέλεσμα της αλυσίδας μεταστοιχείωσης του ουρανίου-238 είναι ο μόλυβδος-206. Κάθε άτομο ουρανίου-238, μέχρι να φτάσει να γίνει μόλυβδος-206 έχει εκπέμψει 9 φωτόνια (ακτινοβολία-γ), 6 ηλεκτρόνια (ακτινοβολία-β) και 8 πυρήνες ηλίου (δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια) (ακτινοβολία-α). Αυτό σημαίνει ότι η απλή μεταστοιχείωση του ουρανίου U-238 σε θόριο-234 με εκπομπή ενός πυρήνα ηλίου δεν εξαλείφει τη ραδιενέργεια της ουσίας, αφού και το θόριο συνεχίζει την αλυσίδα μεταστοιχείωσης μέχρι να συμπληρωθεί ο παραπάνω συνολικός αριθμός ακτινοβολούμενων σωματιδίων για κάθε αρχικό άτομο U-238.

Radionuclide	Half-life	How Produced?	Detected or Measured in:
Beryllium-7 ( $^7\text{Be}$ )	$2.7 \times 10^6$ yr	Cosmic rays	Rain, air
Tritium ( $^3\text{H}$ )	12.3 yr	Cosmic rays	Water, rain, air moisture
Potassium-40 ( $^{40}\text{K}$ )	$1.26 \times 10^9$ yr	Primordial	Water, air, soil, plants, animals
Thorium-232 ( $^{232}\text{Th}$ )	$1.4 \times 10^{10}$ yr	Primordial	Soil
Uranium-238 ( $^{238}\text{U}$ )	$4.5 \times 10^9$ yr	Primordial	Water, air, soil
Uranium-234 ( $^{234}\text{U}$ )	$2.5 \times 10^5$ yr	$^{238}\text{U}$ progeny	Water, air, soil
Radium-226 ( $^{226}\text{Ra}$ )	1,620 yr	$^{238}\text{U}$ progeny	Water

Σχήμα 3.2.1 Ραδιονουκλίδια  
(<http://www.gsseser.com/annuals/2010/Helpful.htm>)

Σύμφωνα με το άρθρο του S. Zajic (Ιούλιος 1999), το **απεμπλουτισμένο ουράνιο** σκοτώνει με δύο τρόπους: με τη ραδιενέργεια που ακτινοβολεί και με τη χημική τοξικότητά του σαν ένα από τα βαρέα μέταλλα. Το ουράνιο συγκρατείται κυρίως από τα νεφρά και τα κόκαλα, αλλά και από τους πνεύμονες, όταν γίνει εισπνοή αδιάλυτων ενώσεων του ουρανίου. Τα νεφρά, μεταξύ άλλων ρυθμίζουν την οξύτητα - αλκαλικότητα του αίματος. Η διαταραχή αυτής της ισορροπίας προς την οξύτητα έχει σαν συμπτώματα την κατάθλιψη, την έλλειψη προσανατολισμού, την κόπωση και προς την αλκαλικότητα την υπερευαισθησία του νευρικού συστήματος, σπασμούς των μυών και νευρική. Επίσης συγκεντρώνεται σε ιστούς όπως η μήτρα και ο πλακούντας, μπορεί να περάσει και στο έμβryo, ενώ διαπερνά και το φράγμα αίματος - εγκεφάλου. Η ραδιενέργεια από το απεμπλουτισμένο ουράνιο προστίθεται στη φυσική ραδιενέργεια του περιβάλλοντος και αυξάνει τις πιθανότητες καρκίνου στον πληθυσμό. Εξαιρετικά τοξικό είναι και το υδροφθόριο που παράγεται όταν το εξαφθοριούχο απεμπλουτισμένο ουράνιο  $\text{UF}_6$  διαφύγει από τα σημεία αποθήκευσής του και αντιδράσει χημικά με την υγρασία της ατμόσφαιρας.

Radio-nuclide	Abundance (%)	Half-Life (Years)	Radio-nuclide	Abundance (%)	Half-Life (Years)
<sup>14</sup> C	trace	$5.73 \times 10^3$	<sup>149</sup> Sm	13.9	$\approx 4 \times 10^{14}$
<sup>40</sup> K	0.012	$1.26 \times 10^9$	<sup>152</sup> Gd	0.20	$1.1 \times 10^{14}$
<sup>48</sup> Ca	0.187	$> 2 \times 10^{16}$	<sup>159</sup> Tb	100	$5 \times 10^{16}$
<sup>50</sup> V	0.25	$6 \times 10^{15}$	<sup>165</sup> Ho	100	$> 6 \times 10^{16}$
<sup>64</sup> Zn	48.6	$> 8 \times 10^{15}$	<sup>169</sup> Tm	100	$> 5 \times 10^{16}$
<sup>70</sup> Zn	0.62	$> 1 \times 10^{15}$	<sup>175</sup> Lu	97.41	$> 1 \times 10^{17}$
<sup>76</sup> Ge	7.8	$> 5 \times 10^{21}$	<sup>176</sup> Lu	2.60	$3.0 \times 10^{10}$
<sup>82</sup> Se	9.19	$1.4 \times 10^{20}$	<sup>174</sup> Hf	0.18	$2.0 \times 10^{15}$
<sup>87</sup> Rb	27.85	$5 \times 10^{11}$	<sup>180</sup> Ta	0.012	$> 1 \times 10^{13}$
<sup>96</sup> Zr	2.80	$> 3.6 \times 10^{17}$	<sup>180</sup> W	0.14	$> 1.1 \times 10^{15}$
<sup>92</sup> Mo	14.8	$4 \times 10^{18}$	<sup>182</sup> W	26.3	$> 2 \times 10^{17}$
<sup>100</sup> Mo	9.6	$\geq 3 \times 10^{17}$	<sup>183</sup> W	14.3	$> 1.1 \times 10^{17}$
<sup>113</sup> Cd	12.26	$9.3 \times 10^{15}$	<sup>186</sup> W	28.6	$> 6 \times 10^{15}$
<sup>116</sup> Cd	7.58	$> 1 \times 10^{17}$	<sup>187</sup> Re	62.6	$7 \times 10^{10}$
<sup>115</sup> In	95.72	$5.1 \times 10^{14}$	<sup>192</sup> Os	41	$> 1 \times 10^{14}$
<sup>124</sup> Sn	5.64	$> 2.4 \times 10^{17}$	<sup>190</sup> Pt	0.013	$7 \times 10^{11}$
<sup>123</sup> Sb	42.75	$1 \times 10^{16}$	<sup>192</sup> Pt	0.78	$1 \times 10^{15}$
<sup>123</sup> Te	0.89	$1.2 \times 10^{13}$	<sup>198</sup> Pt	7.21	$1 \times 10^{15}$
<sup>130</sup> Te	34.48	$2.51 \times 10^{21}$	<sup>196</sup> Hg	0.146	$> 1 \times 10^{14}$
<sup>138</sup> La	0.09	$1.1 \times 10^{11}$	<sup>209</sup> Bi	100	$> 2 \times 10^{18}$
<sup>126</sup> Ce	0.193	$3 \times 10^{11}$	<sup>222</sup> Rn	From <sup>226</sup> Ra	3.82 d
<sup>142</sup> Ce	11.07	$> 5 \times 10^{16}$	<sup>226</sup> Ra	From <sup>230</sup> Th	1622
<sup>141</sup> Pr	100	$> 2 \times 10^{16}$	<sup>230</sup> Th	From <sup>234</sup> U	$8 \times 10^4$
<sup>144</sup> Nd	23.85	$\approx 5 \times 10^{15}$	<sup>232</sup> Th	100	$1.41 \times 10^{10}$
<sup>150</sup> Nd	5.62	$> 5 \times 10^{18}$	<sup>234</sup> U	0.005	$2.47 \times 10^5$
<sup>147</sup> Sm	15.1	$1.06 \times 10^{11}$	<sup>235</sup> U	0.72	$7.1 \times 10^8$
<sup>148</sup> Sm	11.3	$1.2 \times 10^{13}$	<sup>238</sup> U	99.275	$4.51 \times 10^9$

Σχήμα 3.2.2. φυσικά ραδιονουκλίδια και οι κύριες παράμετροι τους.

(Richard Tykva, Josef Sabol, Low-Level Environmental Radioactivity)

Το καρκινογόνο ραδιοϊσότοπο **ιώδιο**  $^{131}\text{I}$ , που αναπνέεται ή καταπίνεται, έχει χρόνο υποδιπλασιασμού ραδιενέργειας 8 μέρες και το μεγαλύτερο ποσοστό ραδιενέργειας αποβάλλεται από τον οργανισμό σε 2 μήνες <sup>[20]</sup>. Συγκεντρώνεται στον θυρεοειδή αδένα και μπορεί με παρατεταμένη δόση να προκαλέσει καρκίνο σε λίγα χρόνια, ενώ σε χαμηλές δόσεις μειώνει την παραγωγή των ορμονών του αδένα. Μετά το ατύχημα στο Τσερνομπίλ τα κρούσματα του καρκίνου του θυρεοειδούς αυξήθηκαν δραματικά, φθάνοντας τις 6.000. Μέσω της τροφής (χόρτα) απορροφάται από τα γαλακτοπαραγωγά ζώα και αποθηκεύεται αμέσως στο γάλα τους που αποτελεί και την κύρια πηγή μόλυνσης του ανθρώπου και ιδιαίτερα των παιδιών που καταναλώνουν πολύ φρέσκο γάλα.

Για προληπτικούς λόγους στην Ιαπωνία μοιράζονταν χάπια ιωδιούχου καλίου. Η προληπτική χορήγηση ιωδιούχου καλίου στην Πολωνία μετά το ατύχημα του Τσερνομπίλ κράτησε τα κρούσματα καρκίνου του θυρεοειδούς σε φυσιολογικά επίπεδα. Οι ειδικοί πιστεύουν ότι με τη χορήγηση ιωδιούχου καλίου ο θυρεοειδής κορεννύεται σε **ιώδιο** και δεν απορροφά το ραδιενεργό ισότοπο.

Το **καίσιο**  $^{137}\text{Cs}$  που είναι πιο επικίνδυνο και έχει διάρκεια ημιζωής περίπου 30 ετών, είναι διαλυτό στο νερό και έτσι φθάνει στον άνθρωπο από τον υδροφόρο ορίζοντα ενώ μπορεί να μολύνει και την τροφή. Έχει μόλις 100 μέρες βιολογικό κύκλο υποδιπλασιασμού και αντίθετα με το **ιώδιο** ισοκατανέμεται στους διάφορους ιστούς. Πειράματα σε σκύλους έδειξαν ότι μια δόση 44 μικρογραμμαρίων ραδιενεργού καϊσίου ανά κιλό ιστού επέφερε τον θάνατο σε διάστημα 3 εβδομάδων. Έτσι θεωρείται ιδιαίτερα τοξικό και για τον άνθρωπο καθώς επηρεάζει τα μαλακά μόρια και συσσωρεύεται στους μυς, το λίπος, το συκωτι, τη σπλήνα. Αντίδοτο στο ραδιενεργό καίσιο, το οποίο κατανέμεται ομοιόμορφα στον οργανισμό με κάπως αυξημένες συγκεντρώσεις στο μυϊκό σύστημα, είναι το κυανούν της Πρωσίας ή Πρωσικό μπλε. Πρόκειται για μια συνθετική χρωστική η οποία συνδέεται μαζί του και επιταχύνει την αποβολή του από τον οργανισμό σταδιακά μέσω των ούρων <sup>[21]</sup>.

Το πιο σημαντικό φυσικό με μεγάλη διάρκεια ζωής ραδιονουκλίδιο είναι το γήινο **κάλιο** που περιέχει 0.0117% από το ραδιοϊσότοπο  $^{40}\text{K}$ . Αυτό το ραδιονουκλίδιο είναι η κύρια πηγή ακτινοβολίας που υφίσταται στο ανθρώπινο σώμα, η οποία κατά μέσο όρο περιέχει περίπου 4.4 kBq από το  $^{40}\text{K}$ .

Το **στρόντιο-90**  $^{90}\text{Sr}$  έχει και αυτό περίπου 30 χρόνια χρόνο ημιζωής και μπορεί να εισπνέεται, αλλά η κατάποσή του στα τρόφιμα και το νερό είναι η μεγαλύτερη ανησυχία για την υγεία. Μόλις εισέλθει στο σώμα, το στρόντιο-90 δρα όπως το ασβέστιο και εύκολα ενσωματώνεται σε οστά και τα δόντια, όπου ο ρυθμός ανανέωσης είναι πολύ αργός, και μπορεί να προκαλέσει καρκίνο των οστών, του μυελού των οστών και των μαλακών ιστών γύρω από το οστό. Επειδή το στρόντιο-90 δρα όπως το ασβέστιο, ο έλεγχος του γάλακτος θα είναι πολύ σημαντικός μετά από μια μεγάλη απελευθέρωση <sup>[20]</sup>. Το στρόντιο-97 μάλιστα συνδέεται με τη λευχαιμία. Είναι λοιπόν κατανοητό ότι όταν τα καταναλώσουμε επηρεάζουν σημαντικά τα κύτταρα μας για δεκαετίες μέχρι να εξασθενήσουν.

Το **πλουτώνιο-239**  $^{239}\text{Pu}$  είναι περισσότερο επικίνδυνο όταν εισπνέεται παρά όταν βρίσκεται έξω από το σώμα <sup>[10]</sup>, καθώς είναι τοξικό και συμβάλλει στην ανάπτυξη καρκίνου του πνεύμονα. Τα σωματίδια άλφα που εκπέμπει μπορούν να σκοτώσουν τα κύτταρα των πνευμόνων, το οποίο προκαλεί ίνωση των πνευμόνων και οδηγεί σε περαιτέρω πνευμονική νόσο και καρκίνο. Το πλουτώνιο μπορεί να εισέλθει στην κυκλοφορία του αίματος από τους πνεύμονες και να ταξιδέψει στα νεφρά, που σημαίνει ότι το αίμα και τα νεφρά θα εκτεθούν σε σωματίδια άλφα. Μόλις το πλουτώνιο κυκλοφορήσει μέσω του σώματος, επικεντρώνεται στα οστά, το ήπαρ, και τη σπλήνα, εκθέτοντας τα σε σωματίδια άλφα. Το πλουτώνιο που προσλαμβάνεται από μολυσμένα τρόφιμα ή νερό δεν αποτελεί σοβαρή απειλή για τον άνθρωπο, επειδή το στομάχι δεν απορροφά το πλουτώνιο εύκολα και έτσι περνά έξω από το σώμα στα περιττώματα. Σοβαρότερη είναι η επίδρασή του στο περιβάλλον, λόγω του τεράστιου χρόνου ημιζωής του.

Το **βάριο-140**  $^{140}\text{Ba}$  συγκεντρώνεται στα οστά, επειδή μοιάζει το μόριο του με εκείνο του ασβεστίου, όπου μπορεί να προκαλέσει καρκίνο 20-30 χρόνια αργότερα. Έχει χρόνο υποδιπλασιασμού ραδιενέργειας 12,8 ημέρες.

Το **κρυπτόν-85**  $^{85}\text{Kr}$  επηρεάζει όλους τους ιστούς του σώματος και μπορεί να ενεργοποιήσει την καρκινογένεση, όπως για παράδειγμα να εμφανιστεί λευχαιμία 2-3 χρόνια αργότερα. Έχει χρόνο υποδιπλασιασμού ραδιενέργειας 10,7 χρόνια.

Υπάρχουν επιπλέον φυσικά ραδιενεργά ισότοπα του βισμούθιου, του θαλλίου, του βαναδίου, του ινδίου, του νεοδυμίου, του γαδολίνιου, του αίφνιου, του λευκόχρυσου, του μολύβδου, του ρήνιου, του λουτήτιου, του ρουβιδίου, του καλίου, του υδρογόνου, του άνθρακα, του λανθανίου και του σαμαρίου.

Ένα ραδιενεργό ισότοπο με κοσμογενετική προέλευση που παράγεται και υφίσταται αενάως στην ατμόσφαιρα είναι το  $^7\text{Be}$  καθώς και άλλα που ανιχνεύονται στην ατμόσφαιρα όπως τα:  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{33}\text{P}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{38}\text{Cl}$ ,  $^{39}\text{Cl}$ ,  $^{32}\text{Si}$ ,  $^{37}\text{Ar}$ ,  $^{39}\text{Ar}$  και  $^{81}\text{Kr}$ , εκ των οποίων άλλα είναι σχετικά βραχύβια και άλλα μακρόβια ραδιενεργά ισότοπα.

Symbol	Radionuclide	Half-life <sup>a,b</sup>	Symbol	Radionuclide	Half-life
$^{241}\text{Am}$	Americium-241	432.2 yr	$^{54}\text{Mn}$	Manganese-54	312.5 d
$^{243}\text{Am}$	Americium-243	7,380 yr	$^{59}\text{Ni}$	Nickel-59	$7.5 \times 10^4$ yr
$^{125}\text{Sb}$	Antimony-125	2.77 yr	$^{63}\text{Ni}$	Nickel-63	96 yr
$^{41}\text{Ar}$	Argon-41	1.827 hr	$^{238}\text{Pu}$	Plutonium-238	87.74 yr
$^{137\text{m}}\text{Ba}$	Barium-137m	2.552 min	$^{239}\text{Pu}$	Plutonium-239	$2.4065 \times 10^4$ yr
$^{140}\text{Ba}$	Barium-140	12.74 d	$^{240}\text{Pu}$	Plutonium-240	$6.537 \times 10^3$ yr
$^7\text{Be}$	Beryllium-7	53.3 d	$^{241}\text{Pu}$	Plutonium-241	14.4 yr
$^{14}\text{C}$	Carbon-14	5,730 yr	$^{242}\text{Pu}$	Plutonium-242	$3.763 \times 10^5$ yr
$^{141}\text{Ce}$	Cerium-141	32.5 d	$^{40}\text{K}$	Potassium-40	$1.28 \times 10^{10}$ yr
$^{144}\text{Ce}$	Cerium-144	284.3 d	$^{226}\text{Ra}$	Radium-226	$1.62 \times 10^3$ yr
$^{134}\text{Cs}$	Cesium-134	2.062 yr	$^{228}\text{Ra}$	Radium-228	5.75 yr
$^{137}\text{Cs}$	Cesium-137	30.0 yr	$^{220}\text{Rn}$	Radon-220	55.6 s
$^{51}\text{Cr}$	Chromium-51	27,704 d	$^{222}\text{Rn}$	Radon-222	3.8235 d
$^{60}\text{Co}$	Cobalt-60	5,271 yr	$^{103}\text{Ru}$	Ruthenium-103	39.28 d
$^{154}\text{Eu}$	Europium-152	13.33 yr	$^{106}\text{Ru}$	Ruthenium-106	368.2 d
$^{154}\text{Eu}$	Europium-154	8.8 yr	$^{90}\text{Sr}$	Strontium-90	29.12 yr
$^3\text{H}$	Tritium	12.35 yr	$^{99}\text{Tc}$	Technetium-99	$2.13 \times 10^5$ yr
$^{129}\text{I}$	Iodine-129	$1.57 \times 10^7$ yr	$^{232}\text{Th}$	Thorium-232	$1.405 \times 10^{10}$ yr
$^{131}\text{I}$	Iodine-131	8.04 d	$^{233}\text{U}$	Uranium-233	$1.585 \times 10^5$ yr
$^{55}\text{Fe}$	Iron-55	2.7 yr	$^{234}\text{U}$	Uranium-234	$2.445 \times 10^5$ yr
$^{59}\text{Fe}$	Iron-59	44,529 d	$^{235}\text{U}$	Uranium-235	$7.038 \times 10^8$ yr
$^{85}\text{Kr}$	Krypton-85	10.72 yr	$^{238}\text{U}$	Uranium-238	$4.468 \times 10^9$ yr
$^{87}\text{Kr}$	Krypton-87	1.27 hr	$^{90}\text{Y}$	Yttrium-90	64.0 hr
$^{88}\text{Kr}$	Krypton-88	2.84 hr	$^{65}\text{Zn}$	Zinc-65	243.9 d
$^{212}\text{Pb}$	Lead-212	10.64 hr	$^{95}\text{Zr}$	Zirconium-95	63.98 d

a. From EPA (1999).  
b. d = days; hr = hours; min = minutes; s = seconds; yr = years.

Σχήμα 3.2.3. Ραδιενεργοί ρύποι και χρόνοι ημιζωής (<http://www.gsseser.com/annuals/2010/Helpful.htm>)

<i>Ισότοπο</i>	<i>Ενεργότητα στο σώμα (Bq)</i>
Ουράνιο-238	0,096
Ράδιο-226	0,45
Ράδιο-228	0,18
Μόλυβδος-210	2,2
Πολώνιο-210	0,74
Κάλιο-40	480
Άνθρακας-14	322
Τρίτιο ( H-3)	103
Ρουβίδιο-87	107
Στρόντιο-90	11

Σχήμα 3.2.4. Μακρόβια ραδιοϊσότοπα φυσικής προέλευσης σε σώματα ανθρώπων.  
([http://www.cup.gr/Downloads/PDF/RADIOACTIVITY\\_IV\\_.pdf](http://www.cup.gr/Downloads/PDF/RADIOACTIVITY_IV_.pdf))



# ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟ

## 4 Βιολογικές επιπτώσεις των ραδιενεργών ρύπων στον ανθρώπινο οργανισμό

Η έκθεση σε ιονίζουσα ακτινοβολία, ανεξάρτητα από το είδος του ραδιενεργού στοιχείου, μπορεί να έχει είτε άμεσα, είτε πιο μακροπρόθεσμα σοβαρά βλαπτικά αποτελέσματα για την ανθρώπινη φυσιολογία και γενικά όλων των ζωντανών οργανισμών.

Ο άνθρωπος δέχεται αρχικά πρόσθετη εξωτερική έκθεση ραδιενεργού ρύπανσης από το έδαφος και εσωτερική από την εισπνοή τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων και την κατανάλωση ρυπασμένων προϊόντων (κυρίως φυτικών) και παραγώγων τους, ενώ παράλληλα αρχίζει η διακίνηση των ραδιενεργών ρύπων μέσω διαφόρων περιβαλλοντικών οδών και τροφικών αλυσίδων στο περιβάλλον του. Με λίγα λόγια δηλαδή, **οι άνθρωποι μπορούν να εισπνεύσουν τα ραδιενεργά σωματίδια, να τα καταπιούν ή αυτά να εισχωρήσουν στο δέρμα τους.** Οι επιστήμονες συχνά δεν διαχωρίζουν την εξωτερική δόση ραδιενέργειας από αυτή που δεχόμαστε εσωτερικά όταν έχουμε εισπνεύσει ή καταναλώσει ένα ραδιενεργό υλικό. Το γεγονός αυτό είναι παραπλανητικό αφού όπως αναφέρει και ο πρώην γραμματέας της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για τους Κινδύνους από Ακτινοβολίες «είναι σαν να συγκρίνουμε το να ζεσταινόμαστε δίπλα σε φωτιά με το να καταπίνουμε αναμμένο κάρβουνο!»<sup>[17]</sup>.

Σύμφωνα με επιστημονική θεωρία, η μακροχρόνια έκθεση σε πολύ χαμηλά επίπεδα ραδιενέργειας (όπως συμβαίνει λόγω της κατανάλωσης κάποιων ραδιενεργών στοιχείων) είναι εκατομμύρια φορές πιο βλαβερή από την μικρής διάρκειας εξωτερική έκθεση σε υψηλά επίπεδα ραδιενέργειας (Petkaou Effect) και είναι πιθανό να σχετίζεται με την ανάπτυξη καρκίνου και άλλων ασθενειών.

Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν ανθρώπινοι πληθυσμοί<sup>[22]</sup>, εκτός από τους ανθρακωρύχους που εργάστηκαν στα ορυχεία τα οποία περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις των προϊόντων διάσπασης του ραδονίου, που έχουν δείξει βιολογικές επιδράσεις που μπορούν να συσχετιστούν με την εισπνοή των ραδιενεργών ρύπων, ήταν απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν για τις έρευνες

δεδομένα από πειράματα σε ζώα για να περιγράψουν τις επιπτώσεις στην υγεία από τη ραδιενέργεια. Τα ραδιονουκλίδια κατατέθηκαν στην αναπνευστική οδό είτε «αδιάλυτα» (δεν μετατοπίζονταν εύκολα σε άλλους ιστούς ή απεκκρίνονταν), είτε «σχετικώς διαλυτά» (πιο εύκολα μετατοπίζονταν σε άλλους ιστούς ή αποβάλλονταν), βγάζοντας μετά από έρευνες πορίσματα για τις βιολογικές επιδράσεις που προκύπτουν από την εισπνοή ραδιονουκλιδίων. **Είναι αυτονόητο λοιπόν ότι η δόση της ισχυρής ή ασθενής ακτινοβολίας, η διάρκεια της έκθεσης του οργανισμού και το πόσο απέχει αυτός από την πηγή της ακτινοβολίας καθώς επίσης και το είδος των ραδιενεργών σωματιδίων, καθώς μερικά είναι πιο επικίνδυνα ή πιο ανθεκτικά από άλλα, παίζουν καθοριστικό ρόλο για τις μετέπειτα συνέπειες όποιες και αν είναι αυτές.**

Ειδικότερα, η Επιστημονική Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για τις Επιπτώσεις της Ατομικής Ακτινοβολίας εξηγεί ότι η ιονίζουσα ακτινοβολία διασπά τους χημικούς δεσμούς σε μόρια (DNA, πρωτεΐνες) των κυττάρων μας και ο οργανισμός μας ανταποκρίνεται στην πρόκληση θέτοντας σε λειτουργία τους μηχανισμούς επιδιόρθωσης που διαθέτει <sup>[21]</sup>. Ωστόσο, όταν η επίθεση που έχει δεχθεί είναι ισχυρή (μεγάλη δόση ακτινοβολίας) και διασκορπισμένη σε ολόκληρο το σώμα (σε αντίθεση με την θεραπευτική ακτινοβολία που είναι πάντοτε εντοπισμένη), οι μηχανισμοί επιδιόρθωσης δεν μπορούν να αντεπεξέλθουν. Έτσι, ιστοί και κυτταρικοί τύποι που πολλαπλασιάζονται έντονα, είναι αυτοί που πλήττονται περισσότερο, μεταξύ αυτών είναι και τα αιμοποιητικά κύτταρα του μυελού των οστών, αλλά και τα επιθηλιακά κύτταρα του γαστρεντερικού συστήματος. Δεν είναι λοιπόν περίεργο που η ναυτία και οι εμετοί είναι τα πρώτα συμπτώματα της έκθεσης σε ραδιενέργεια, ακολουθούμενα από διάρροιες, πυρετό και πονοκεφάλους.

*Η έκθεση σε πολύ ισχυρές δόσεις ακτινοβολίας μπορεί να ακολουθηθεί από άμεση καταστροφή κυττάρων, οργάνων και συστημάτων και να οδηγήσει πολλές φορές στο θάνατο του ανθρώπου. Τέτοιες δόσεις που οδηγούν σε άμεσα αποτελέσματα, παρατηρήθηκαν μόνο σε μεγάλα ραδιολογικά ή πυρηνικά ατυχήματα όπως στην περίπτωση της Ιαπωνίας, με τους αντιδραστήρες της Φουκουσίμα. Το φαινόμενο περιγράφεται με τον όρο «ντετερμινιστικά αποτελέσματα» (deterministic effects) και ήταν αυτά που ευθύνονταν για τους πρώτους θανάτους που υπήρξαν στο Τσερνόμπιλ <sup>[23]</sup> και αφορούσαν κυρίως το*

προσωπικό του εργοστασίου (24 άτομα τα οποία πέθαναν μέσα στους επόμενους τέσσερις μήνες από το ατύχημα). Ένα άλλο χαρακτηριστικό ντετερμινιστικό αποτέλεσμα είναι η **ανάπτυξη καταρράκτη** μεταξύ των ατόμων που δέχθηκαν μεγάλες δόσεις ακτινοβολίας.

Άλλες επιπτώσεις της έκθεσης σε ραδιενέργεια συχνά διαπιστώνονται όχι μόνο στα άτομα που εκτέθηκαν σε αυτήν αλλά **και στους απογόνους τους**, καθώς το DNA είναι το υλικό που **κληροδοτείται** από τη μια γενιά στην επόμενη και το οποίο υφίσταται μεταλλάξεις από την ακτινοβολία.

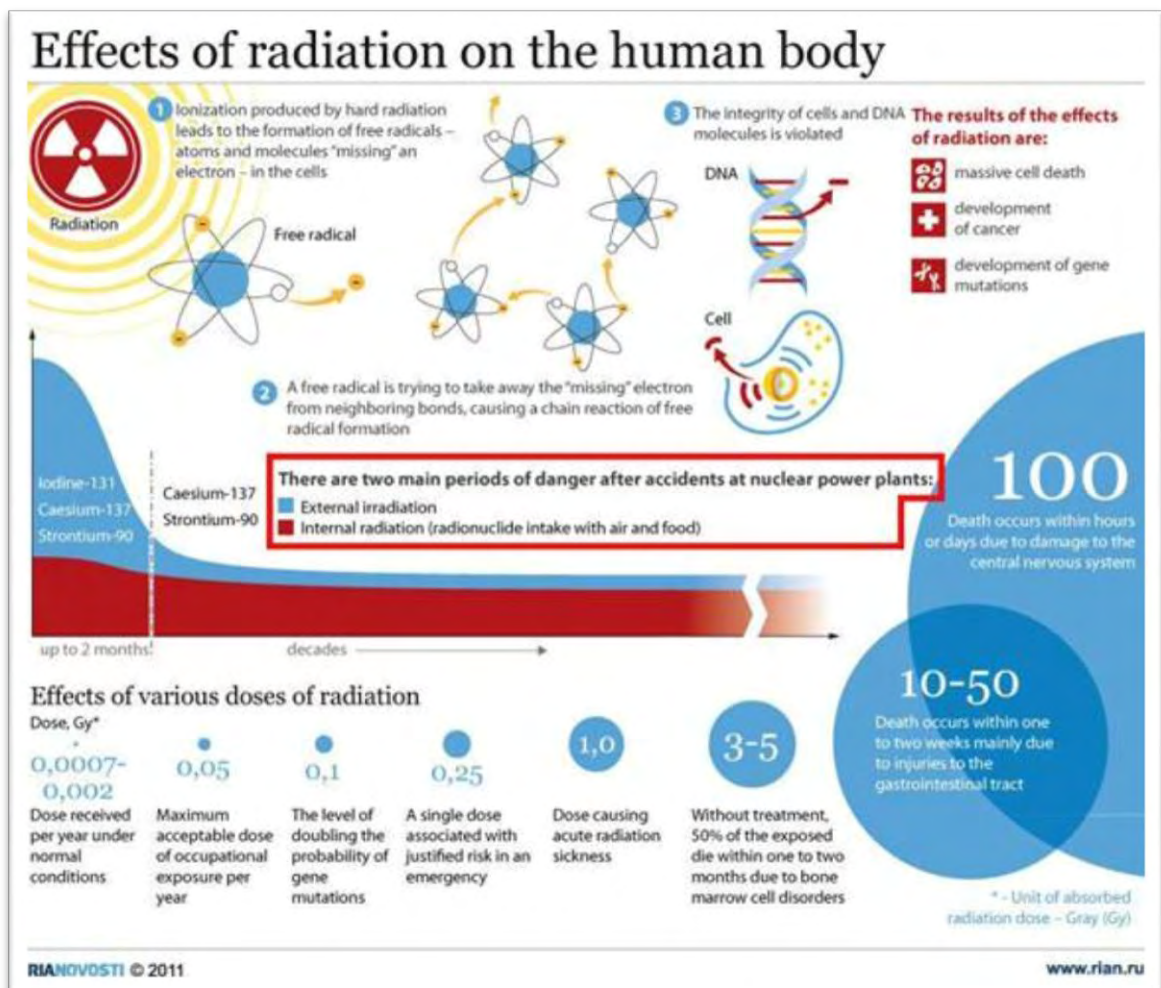
Όπως προαναφέραμε ο κίνδυνος για τα μακροπρόθεσμα αποτελέσματα της ακτινοβολίας εξαρτάται από τη λεγόμενη ενεργό δόση, η οποία με τη σειρά της, εξαρτάται από την απορροφούμενη στο ανθρώπινο σώμα ενέργεια, το είδος της ακτινοβολίας και το είδος του ακτινοβολουμένου ιστού. Οι μέχρι τώρα επιστημονικές μελέτες έχουν εστιάσει κυρίως στον κίνδυνο καρκίνου λόγω μεγάλων δόσεων ακτινοβολίας και υπάρχει μικρότερη μελέτη σχετικά με τις συνέπειες της έκθεσης σε μικρές δόσεις.

Για σχετικά χαμηλές δόσεις, μικρότερες από αυτές που οδηγούν σε άμεσα αποτελέσματα, υπάρχει στατιστικά και η πιθανότητα **μελλοντικής εμφάνισης καρκίνου**, είτε διευκολύνοντας την πρόοδο ήδη υπάρχοντων για άλλους λόγους καρκίνων, είτε μειώνουν την ικανότητα αντίστασης των κυττάρων στη γένεση ενός καρκίνου, που είναι τόσο πιθανότερη όσο μεγαλύτερη είναι η δόση της ακτινοβολίας. Έτσι η μικροκυματική ακτινοβολία απορροφάται κοντά στο δέρμα, ενώ τα ραδιοκύματα διεισδύουν βαθύτερα στο σώμα και απορροφάται από τα όργανα που βρίσκονται στο εσωτερικό του. Σύμφωνα με το Εργαστήριο Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος (Π. Κρητίδης, Ε. Φλώρου, Χ. Χαλούλου, ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος) <sup>[24]</sup>, η ραδιολογική ιδιαιτερότητα των θερμών σωματιδίων ως συστατικών των ραδιενεργών ρύπων που εκπέμπουν β-ακτινοβολία συνίσταται στη δυνατότητα εγκλωβισμού τους στο αναπνευστικό σύστημα και δημιουργίας περιοχών που ακτινοβολούνται με υψηλές, αλλά υπο-νεκρωτικές δόσεις, οπότε μεγιστοποιείται η πιθανότητα επιβίωσης γενετικά μεταλλαγμένων κυττάρων. Σημαντικές είναι και οι βλάβες που μπορεί να προκληθούν **στο γενετικό του υλικό του κυττάρου (στο DNA)**, διότι αυτές συνδέονται τόσο με τη μεταβίβαση κληρονομικών ανωμαλιών στους απογόνους, όσο και με τη διαδικασία της καρκινογένεσης. Οι ακτινοβολίες

περιλαμβάνονται στους περίπου 4.000 γνωστούς καρκινογόνους παράγοντες, σύμφωνα με την Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ).

Πιο ευαίσθητοι στη ραδιενέργεια είναι ο **θυρεοειδής** (καρκίνος του συγκεκριμένου αδένα) και ο **μυελός των οστών** (λευχαιμία).

Στο ανθρώπινο σώμα κυκλοφορούν ηλεκτρικά ρεύματα, τα οποία είναι απαραίτητα για τις φυσιολογικές λειτουργίες του οργανισμού. Όλες οι δομές του νευρικού συστήματος λειτουργούν μεταδίδοντας παλμικά ηλεκτρικά σήματα, ενώ σχεδόν όλες οι βιοχημικές αντιδράσεις, από την πέψη μέχρι την εγκεφαλική λειτουργία, περιλαμβάνουν ηλεκτρικές διεργασίες. Επίσης είναι γνωστό ότι οι ιστοί περιέχουν κατά 70% νερό, τα μόρια του οποίου είναι σαν ηλεκτρικά δίπολα. Επομένως, η διείσδυση ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στον οργανισμό και η αλληλεπίδρασή του με τα δίπολα αυτά ή με τα φυσικά πεδία του οργανισμού, είναι δυνατόν να προκαλέσει επιπλοκές.



Σχήμα 4.1. Βιολογικές επιπτώσεις της ραδιενέργειας στον άνθρωπο.

(<http://www.dailyinfographic.com/effects-of-radiation-on-the-human-body-infographic>)

Γενικώς η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία έχει **θερμικές επιπτώσεις** στον άνθρωπο <sup>[25]</sup>. Καθώς διεισδύει μέχρι μικρού βάθους στο σώμα, απορροφάται και προκαλεί κίνηση των μορίων, τα οποία με τις τριβές και τις κρούσεις εν συνεχεία προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας των ιστών. Οι όρχις και τα μάτια είναι τα ευπαθέστερα σημεία, επειδή απάγουν σε μικρότερο βαθμό τη συσσωρευμένη θερμότητα, λόγω μικρότερης κυκλοφορίας του αίματος. Οι θερμικές επιπτώσεις συμβαίνουν για συχνότητες πάνω από περίπου 100 KHz και οι βλάβες προκαλούνται αν ο θερμορυθμιστικός μηχανισμός του σώματος δεν καταφέρει να επαναφέρει την κανονική θερμοκρασία. Για να είναι παρατηρήσιμη η αύξηση της θερμοκρασίας, πρέπει η πυκνότητα ισχύος να είναι πολύ μεγάλη ( $1\text{mW}/\text{cm}^2$ ) ή η μέση τιμή ενέργειας που απορροφάται από όλο το σώμα (SAR) να είναι πάνω από 5 W/kg. Όταν τα παραγόμενα ποσά θερμότητας είναι σχετικά μικρά, οι θερμορυθμιστικοί μηχανισμοί μπορούν να απάγουν αυτήν τη θερμότητα διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία στους 36-37 °C. Αντίθετα, όταν τα ποσά θερμότητας υπερβούν κάποια τιμή, τότε οι μηχανισμοί αυτοί δεν μπορούν να λειτουργήσουν σωστά και επέρχεται αύξηση της θερμοκρασίας σε ιστούς ή όργανα του σώματος που ξεπερνά τους 37 βαθμούς.

Επίσης έχει και μη θερμικές επιπτώσεις, οι οποίες αναφέρονται στη δράση της ακτινοβολίας στη λειτουργία των συστατικών των κυττάρων, αν και δεν είναι γνωστός ο μηχανισμός που η ακτινοβολία δρα στα κύτταρα. Ίσως επηρεάζουν τη ροή του ασβεστίου διά μέσου των τοιχωμάτων των κυττάρων. Οι μη-θερμικές επιπτώσεις θεωρούνται και οι πιο σημαντικές από βιολογικής/ιατρικής σκοπιάς και δεν καλύπτονται από τα όρια ασφαλείας που έχουν θεσπισθεί, επειδή δεν είναι άμεσα μετρήσιμες με κάποιο όργανο.

Η μείωση της διάρκειας ζωής μετά την εισπνοή των ραδιονουκλιδίων <sup>[22]</sup> συνοδεύτηκε με/ή προκλήθηκε από ορισμένες *παθολογικές αλλαγές*, μερικές από τις οποίες αντανακλούνται σε κλινικά σημάδια και συμπτώματα. Ορισμένες από αυτές τις επιδράσεις φαίνεται να θεωρούνται **μη-στοχαστικές**, δηλαδή ο βαθμός της επίδρασης, παρά την εμφάνισή τους, είναι συνάρτηση της δόσης όπως για παράδειγμα είναι η λεμφοπενία, η αναπνευστική ανεπάρκεια, η πνευμονική και λεμφαδεύα ίνωση και η κυτταρική μεταπλασία. Φαινόμενα όπως η ανάπτυξη καρκίνου ή η εμφάνιση κληρονομήσιμων ανωμαλιών, η πνευμονική και οστική νεοπλασία είναι **στοχαστικά** καθώς οι πιθανότητες εμφάνισης

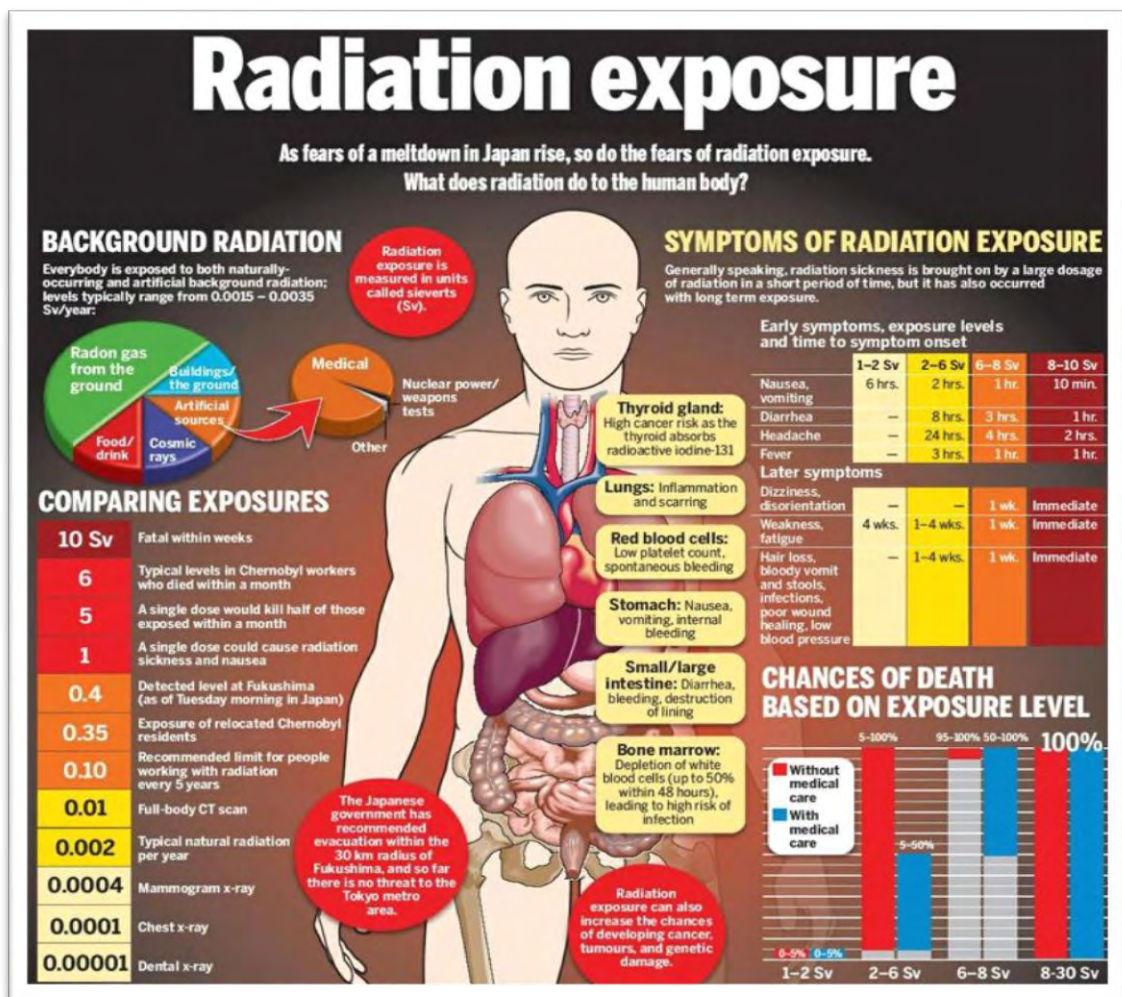
σχετίζονται με τη δόση της έκθεσης σε ακτινοβολία (δόση που κυμαίνεται έως περίπου 100 mGy). Δεδομένου ότι ένα πλήρες φάσμα των δόσεων δεν έχει διερευνηθεί για τυχόν εισπνεόμενα ραδιονουκλίδια σε κανένα είδος ζώου που γίνονται τα πειράματα, δεν είναι δυνατόν να γνωρίζουμε τις χαμηλότερες δόσεις στις οποίες θα συμβεί οποιαδήποτε βιολογική επίδραση, ούτε καν την υψηλότερη δόση στην οποία δε θα συμβεί. Παρόλα αυτά, χρησιμοποιήθηκαν τα διαθέσιμα στοιχεία για να στηρίξει τις αποφάσεις σχετικά με τη χαμηλότερη σειρά δόσεων στην οποία είναι πιθανό να εμφανιστούν οι μη-στοχαστικές επιπτώσεις. Για στοχαστικές συνέπειες, όπως η θανατηφόρα νεοπλασία, αναπτύχθηκαν εκτιμήσεις για τη συχνότητα της εμφάνισής τους.

Μετά από την εισπνοή των ραδιονουκλιδίων, **αιματολογικές επιδράσεις** συμβαίνουν λόγω της ακτινοβολίας του αιμοποιητικού ιστού στον οποίο βρίσκονται τα ραδιονουκλίδια (μετατοπισμένα ή κατατιθέμενα) και λόγω της άμεσης ακτινοβολίας μέσω του αίματος που κυκλοφορεί στους πνεύμονες, το ήπαρ και ίσως τους λεμφαδένες που περιέχει το ραδιονουκλίδιο.

**Λεμφοκυτοπενία** παρατηρήθηκε σε ζώα μετά την εισπνοή των διαλυτών μορφών των εκπομπών άλφα ή βήτα και γάμμα. Δεδομένου ότι τόσο η έκταση όσο και ο χρόνος της έναρξης της λεμφοκυτοπενίας είναι δόσοεξαρτώμενες, η ασθένεια αυτή προκαλούμενη από χαμηλές δόσεις ακτινοβολίας δε θα συμβεί μέχρι πολύ μετά την έκθεση στο τεχνητό ραδιοϊσότοπο και θα μπορούσε να είναι οριακά ανιχνεύσιμη.

**Αναπνευστική** ανεπάρκεια (που χαρακτηρίζεται από αυξημένη αναπνευστικό ρυθμό, μειωμένη αρτηριακή ροή O<sub>2</sub> (P<sub>o2</sub>) και αυξημένη CO<sub>2</sub> (P<sub>co2</sub>) που προκαλείται από διάχυτη ίνωση των πνευμόνων) και **κυψελιδικό οίδημα** μπορεί να προκαλέσει θάνατο μέσα σε ένα μήνα μετά την εισπνοή μεγάλων ποσοτήτων άλφα ή βήτα ραδιονουκλίδια που εκπέμπουν ακτίνες γάμμα. Ο θάνατος από αναπνευστική ανεπάρκεια και ίνωση μπορεί επίσης να προκληθεί μετά από έκθεση σε πολύ χαμηλότερες δόσεις και μπορεί να συμβεί σε τρωκτικά μετά από πολλούς μήνες και σε σκύλους μετά από αρκετά χρόνια σύμφωνα με πειράματα που έχουν γίνει. Η αναπνευστική ανεπάρκεια είναι η κύρια αιτία θανάτου σε αυτές τις ομάδες ζώων που παρουσίασαν σημαντικά μειωμένη μέση διάρκεια ζωής. Τα διαθέσιμα δεδομένα (Environment, Health and Safety Research Program, Pacific Northwest Laboratory,

Battelle Boulevard, Richland, WA 99352, U.S.A.) [22] από διάφορα είδη ζώων δείχνουν ότι η **αναπνευστική ανεπάρκεια** και ενδεχομένως ο θάνατος που προκύπτει από εκτεταμένη **ίνωση των πνευμόνων** που προκαλείται από την ακτινοβολία από εισπνεόμενα ραδιονουκλίδια είναι μη-στοχαστικές επιπτώσεις. Οι λεμφαδένες που περιέχουν ραδιονουκλίδια μπορεί να έχουν υποστεί μεγάλη ζημιά. Οι πρωτογενείς βλάβες χαρακτηρίζονται από **λεμφαδενίτιδα και ίνωση** με μερική έως πλήρη εξάντληση των βλαστικών κέντρων. Πρωτογενής νεοπλασία δε φαίνεται να συμβαίνει σε λεμφαδένες των πειραματόζωων που εισπνέουν άλφα ή βήτα-γάμμα εκπομπές ακτινοβολίας. Η σχέση δόσης-αποτελέσματος για μη νεοπλαστικές βλάβες στους τραχειοβρογχικούς λεμφαδένες είναι ελάχιστα γνωστές μέχρι σήμερα.



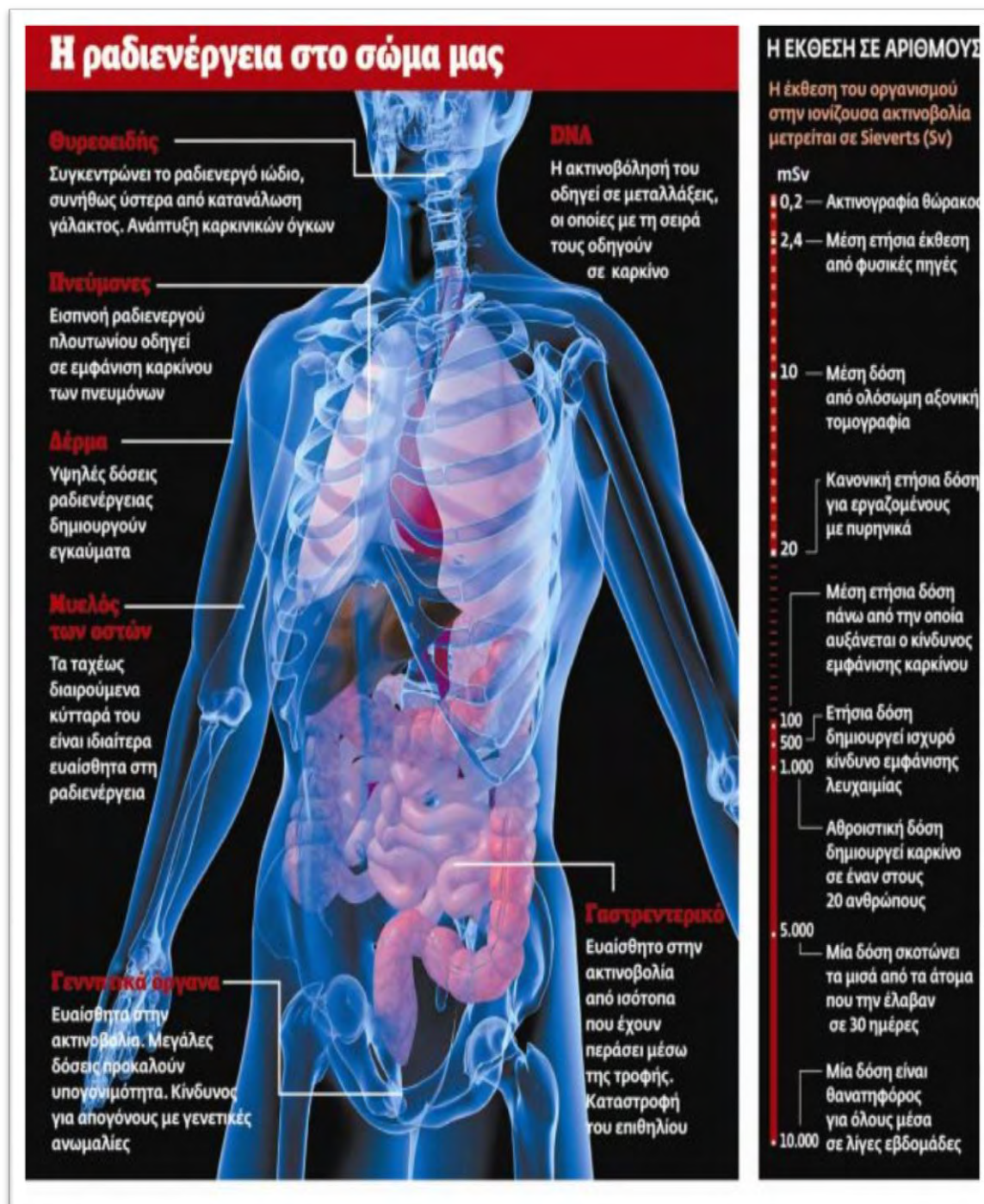
Σχήμα 4.2. Συμπτώματα ραδιενεργών ρύπων.

(<https://heliospectrum.blogspot.gr/2015/10/radiation-damage-to-dna.html>)

Μια ακόμη βιολογική επίπτωση της ραδιενέργειας είναι η **πνευμονική νεοπλασία** η οποία έχει πλέον ταυτοποιηθεί σε ανθρακωρύχους ως συνέπεια της εισπνοής των θυγατρικών του ραδονίου που εκπέμπουν άλφα ακτινοβολία. Αν και η πνευμονική νεοπλασία δεν έχει αναφερθεί σε ανθρώπινα όντα που εκτεθεί σε άλλα ραδιονουκλίδια, έχει όμως καταδειχθεί σε πειραματόζωα ως μια πιθανή συνέπεια της εισπνοής πολλών διαφορετικών ραδιονουκλιδίων που εκπέμπουν άλφα ή βήτα-γάμμα ακτινοβολία. Σε μελέτες ραδιονουκλιδίων βήτα-γάμμα εκπομπής, τα οποία αποτίθενται με εισπνοή ή με ενδοτραχειακή ένεση στα πειραματόζωα, η αρχική επιβάρυνση των πνευμόνων πάνω από 0,1  $\mu\text{Ci/g}$  οδήγησε σε αυξημένα περιστατικά των καρκίνων του πνεύμονα. Δεν υπάρχουν στοιχεία σε χαμηλότερες από αυτήν δόσεις. Τα αρχικά στοιχεία για τις άλφα εκπομπές δείχνουν ότι οι αδιάλυτες άλφα εκπομπές ήταν ελαφρώς πιο αποτελεσματικές από τις διαλυτές άλφα εκπομπές στην πρόκληση καρκίνου του πνεύμονα σε πειραματόζωα. Η **πνευμονική καρκινογένεση** είναι η πιο σοβαρή επίδραση των χαμηλών δόσεων εισπνεόμενων ραδιονουκλιδίων. Τα κύτταρα που κινδυνεύουν είναι τα πρόδρομα κύτταρα και τα βασικά κυτταρικά στρώματα του επιθηλίου της αναπνευστικής οδού.

Είναι καλά τεκμηριωμένο <sup>[26]</sup> ότι ραδιονουκλίδια που εκπέμπουν άλφα ακτινοβολία όπως το ράδιο, εναποτίθενται σε οστικό ιστό και μπορεί να προκαλέσουν **οστεοσαρκώματα** στους ανθρώπους. Έτσι, η **νεοπλασία οστών** είναι μια πιθανή συνέπεια της εισπνοής ραδιονουκλιδίων που εκπέμπουν άλφα ακτινοβολία, εάν επαρκείς ποσότητες μετατοπίζονται προς τα οστά. Σε πειραματόζωα έχει παρατηρηθεί αυτό σε επίπεδα δόσης των περίπου 0,01  $\mu\text{Ci/g}$  πνεύμονα εισπνεόμενων διαλυτό πλουτώνιο και άλλα υπερουρανίων στοιχείων.





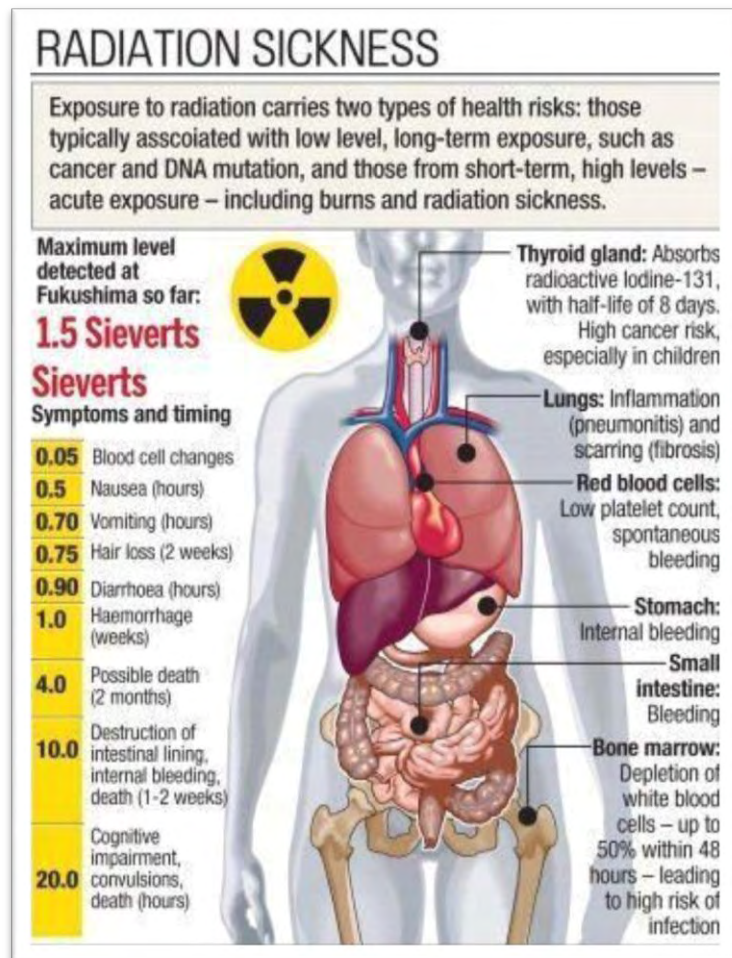
Σχήμα 4.3. Η ραδιενέργεια στο σώμα μας.

(<http://www.tovima.gr/science/article/?aid=390406>)

Μάλιστα, μετά το ατύχημα στο Τσερνόμπιλ το Baylor College of Medicine στο Χιούστον των ΗΠΑ [23], σε συνεργασία με πλήθος επιστημόνων απ' όλο τον κόσμο μελέτησε τα αποτελέσματα της έκθεσης σε χαμηλές δόσεις της ιονίζουσας ακτινοβολίας σε πληθυσμούς κοντά στο Τσερνομπίλ και είκοσι χρόνια μετά ανακοίνωσαν τα αποτελέσματά τους. Σύμφωνα με αυτά, η επίδραση της ιονίζουσας ακτινοβολίας στον πληθυσμό είναι πιο επικίνδυνη στις ηλικίες μεταξύ 0 και 14 ετών και μπορεί να έχει τις πλέον αρνητικές συνέπειες.

Οι εγκυμονούσες γυναίκες εμφάνισαν με μεγαλύτερη συχνότητα ψυχιατρικές ασθένειες, ενώ τα παιδιά που δέχθηκαν ακτινοβολία κατά την εμβρυϊκή ζωή τους εμφάνισαν αυξημένα ποσοστά νευρολογικών διαταραχών ή και καθυστέρηση στη νοητική τους ανάπτυξη σε σχέση με τα υγιή παιδιά. Επίσης παρατηρήθηκε μια μικρή αύξηση των λευχαιμιών, των συμπαγών όγκων, των καρδιαγγειακών προβλημάτων καθώς και των δυσλειτουργιών του θυρεοειδούς και των αναπαραγωγικών ιδιαίτερα στις γυναίκες που ήταν παιδιά ή έφηβες όταν συνέβη το ατύχημα. Εκτός

αυτών, η εκκένωση περιοχών, η ανεργία και τα οικονομικά προβλήματα που ακολούθησαν το ατύχημα επηρέασαν ψυχολογικά μεγάλη μερίδα πληθυσμού, γεγονός που από μόνο του είχε αρνητικές επιπτώσεις υγείας.



Σχήμα 4.4. Επιπτώσεις ραδιενέργειας και μέγιστες τιμές που παρατηρήθηκαν στη Φουκουσίμα. <http://medaddicts.blogspot.gr/2012/12/acute-radiation-syndrome-ars-also-known.html>

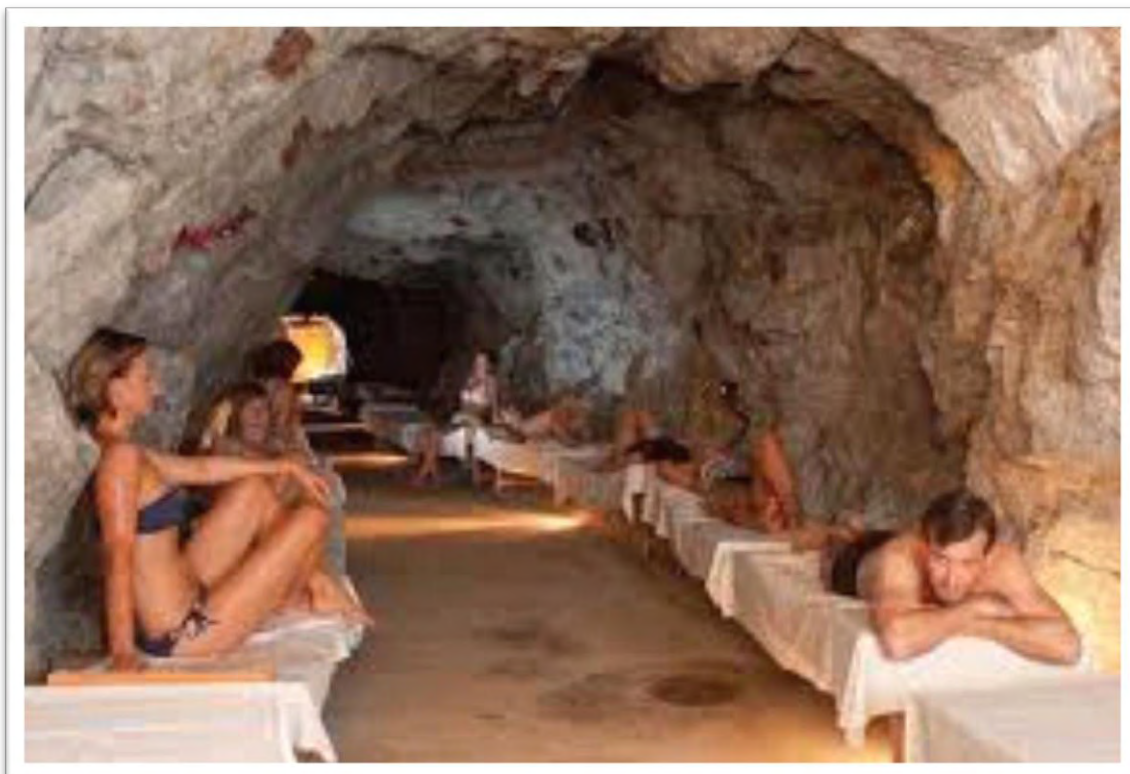
Ο συνήθης διαχωρισμός των ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών <sup>[17]</sup> σε ιονίζουσες και μη, δημιουργεί την λανθασμένη εντύπωση ότι η μόνη βιολογικά επιβλαβής διαδικασία είναι ο ιονισμός και ότι οι μη ιονίζουσες ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες από το ηλεκτρικό δίκτυο, τις κεραίες κινητής τηλεφωνίας, τα ασύρματα τηλέφωνα, WiFi κ.λπ. δεν είναι βλαβερές. Ωστόσο, σε αντίθεση με τις ραδιενεργές ιονίζουσες ακτινοβολίες που υπήρχαν πάντοτε κατά την εξέλιξη του ανθρωπίνου είδους, οι μη ιονίζουσες ακτινοβολίες είναι επί το πλείστον τεχνητές και έχουν εισαχθεί πρόσφατα στο περιβάλλον, ενώ σύμφωνα με μερίδα επιστημόνων πολύ χαμηλά επίπεδα έκθεσης σε μη ιονίζουσες ακτινοβολίες μπορούν μακροπρόθεσμα να προκαλέσουν σημαντικές επιπτώσεις στην υγεία, μέσω πολλών βιολογικών μηχανισμών που δεν έχουν σχέση με τον ιονισμό.

## 4.1 Η Ραδιενέργεια δεν είναι πάντα βλαβερή

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία από την κάθε μορφή ραδιενέργειας εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες όπως *το είδος της ραδιενέργειας, την ενεργό δόση ραδιενέργειας, τον ρυθμό ενεργού δόσης, τον χρόνο έκθεσης, από το αν η έκθεση είναι εξωτερική ή εσωτερική αλλά και από τον χρόνο εξασθένησης του κάθε ραδιενεργού στοιχείου*. Δεδομένου ότι ο άνθρωπος ήταν πάντοτε εκτεθειμένος σε ραδιενέργεια από το φυσικό περιβάλλον και ραδιενεργές εξασθενήσεις γίνονται συνέχεια στο ανθρώπινο σώμα, ο οργανισμός μας έχει αναπτύξει κάποιους μηχανισμούς προσαρμογής σε αυτή. Όπως αναφέρει και η Επιστημονική Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για τις Επιπτώσεις της Ατομικής Ακτινοβολίας, «Η βλάβη από τη ραδιενέργεια συνήθως θα επισκευαστεί από αυτές τις κανονικές διαδικασίες επισκευής κυττάρων» <sup>[17]</sup>. Μερίδα επιστημόνων μάλιστα υποστηρίζει ότι οι βλάβη στα κύτταρα που προκαλεί η ιονίζουσα ακτινοβολία, όταν είναι ελεγχόμενη, μπορεί να ενισχύσει τον οργανισμό, όπως ακριβώς γίνεται με την παραγωγή ελευθέρων ριζών ή/και τη περιορισμένη φλεγμονή κατά τη διάρκεια της φυσικής άσκησης. **Δεν είναι τυχαίο άλλωστε ότι η έκθεση σε συγκεκριμένα είδη ραδιενέργειας, γινόταν ηθελημένα εδώ και αιώνες για θεραπευτικούς σκοπούς και ήταν πολύ διαδεδομένη στις αρχές του 20ου αιώνα στην ιατρική κοινότητα**. Ο Αμερικανικός Ιατρικός Σύλλογος είχε προωθήσει τη χρήση ραδιενεργού ραδίου σε διάφορες θεραπείες.

Σύμφωνα με την θεωρία Hormesis (από την ελληνική λέξη ορμή) η οποία υποστηρίζει ότι η ραδιενέργεια μπορεί να έχει και ενισχυτική **για τον ανθρώπινο οργανισμό επίδραση**, οι αρνητικές επιπτώσεις από τοξικές ουσίες, ραδιενέργεια κλπ. δεν είναι γραμμικώς ανάλογες με την ποσότητα της έκθεσης. Συγκεκριμένες δόσεις καθώς και η περιοδική έκθεση με μικρές ή μεσαίες δόσεις ραδιενέργειας είναι ωφέλιμες για τον οργανισμό αφού προκαλούν την *διέγερση όλων των συστημάτων του οργανισμού για την επιδιόρθωση των προσωρινών βλαβών, του ανοσοποιητικού συστήματος και τους μηχανισμούς επιδιόρθωσης του γενετικού υλικού*.

Αναζωογονεί τα κύτταρα, ενεργοποιεί σημαντικά ένζυμα βοηθώντας στην ρύθμιση του στρες και καταστέλλει τον καρκίνο, την υπέρταση και το διαβήτη ενώ βελτιώνει σημαντικά τα ποσοστά επιβίωσης πειραματόζων από την έκθεση σε υψηλά επίπεδα ραδιενέργειας. Αντίστοιχα, οι κάτοικοι φυσικά ραδιενεργών περιοχών παρουσιάζουν τις μισές χρωμοσωματικές ανωμαλίες από τους υπόλοιπους όταν δεχτούν υψηλή δόση ακτινοβολίας. Εφαρμόζεται σε ολόκληρο το σώμα **σαν εναλλακτική θεραπεία για τον καρκίνο**. Έχει μάλιστα ενισχυτική επίδραση στον οργανισμό, σε αντίθεση με την υψηλότερη έντασης ιονίζουσα ακτινοβολία που χρησιμοποιείται τοπικά στις συνηθισμένες ακτινοθεραπείες και έχει πολλές παρενέργειες. Χρησιμοποιείται για τη θεραπεία αρθρίτιδας, άσθματος και πληθώρας άλλων ασθενειών σε δεκάδες ιαματικά λουτρά ραδιενεργού ραδονίου (radon spas) σε όλο τον κόσμο (στην Ελλάδα: στα Καμένα Βούρλα, την Ικαρία κ.α.). Τα επίπεδα ραδιενέργειας στα ιαματικά λουτρά ραδονίου μπορεί να είναι πολύ ανεβασμένα – π.χ. στη Μοντάνα των Η.Π.Α. είναι 400 φορές μεγαλύτερα από το συνιστώμενο όριο από το αμερικανικό Πρακτορείο Περιβαλλοντικής Προστασίας.



Σχήμα 4.1.1. Ιαματικά λουτρά ραδονίου.

(<http://www.home-biology.gr/ilektromagnitikes-aktinovolies/ionizouses-aktinovolies>)

## ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΩΝ ΡΥΠΩΝ

### 5 Δόση ραδιενεργών ρύπων

Σύμφωνα με την Υπηρεσία Περιβαλλοντικής Προστασίας (ΕΡΑ) υπάρχουν αρκετές διαφορετικές αλλά αλληλένδετες μονάδες για τη μέτρηση της ραδιενέργειας και των επιπτώσεών της. Η ραδιενέργεια αναφέρεται στην ποσότητα της ιονίζουσας ακτινοβολίας που απελευθερώνεται από ένα υλικό. Είτε εκπέμπει άλφα ή βήτα σωματίδια, ακτίνες γάμμα ή ακτίνες Χ, μια ποσότητα ραδιενεργού υλικού εκφράζεται σε όρους της ραδιενέργειάς του (ή απλά της δραστηριότητάς του). Αυτή αντιπροσωπεύει πόσα άτομα του υλικού φθείρονται σε μια δεδομένη χρονική περίοδο.

Η σοβαρότητα της κάθε άμεσης επίδρασης από τη ραδιενέργεια θα εξαρτηθεί από το συνολικό ποσό της έκθεσης σε ακτινοβολία μέσα σε μια δεδομένη χρονική περίοδο που ονομάζεται δόση ακτινοβολίας<sup>[17]</sup>. Η **ενεργός δόση Sievert (Sv)** είναι η πιο διαδεδομένη μονάδα μέτρησης της ιονίζουσας ακτινοβολίας στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI) και μετράει τις επιπτώσεις χαμηλής εντάσεως ακτινοβολίας στο ανθρώπινο οργανισμό και στην υγεία του καθώς εξαρτάται από το είδος της ακτινοβολίας (α, β, γ, Χ, κτλ.) και την απορροφούμενη από το ανθρώπινο σώμα ενέργεια. Κατά πολλούς, πιο αξιόπιστο μέγεθος από την ενεργό δόση για την πρόβλεψη επιπτώσεων υγείας,

Symbol	Name
Bq	Becquerel
Ci	Curie (37,000,000,000 Bq)
mCi	Millicurie ( $1 \times 10^{-3}$ Ci)
μCi	Microcurie ( $1 \times 10^{-6}$ Ci)
mrad	Millirad ( $1 \times 10^{-3}$ rad)
mrem	Millirem ( $1 \times 10^{-3}$ rem)
R	Roentgen
mR	Milliroentgen ( $1 \times 10^{-3}$ R)
μR	Microroentgen ( $1 \times 10^{-6}$ R)
Sv	Sievert (100 rem)
mSv	Millisievert (100 mrem)

Σχήμα 5.1. Μονάδες μέτρησης της ραδιενέργειας  
(<http://www.gsseser.com/annuals/2010/Helpful.htm>)

είναι ο **ρυθμός ενεργού δόσης** ραδιενέργειας που συνήθως μετράται σε μετράται σε  $\mu\text{Sv/h}$  (μικρο-σιβέρτ ανά ώρα). Άλλη μονάδα που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ραδιενέργειας στο έδαφος, το νερό και τον αέρα που προέρχεται από την ανθρώπινη χρήση των ραδιενεργών στοιχείων είναι **Becquerel** που αντιστοιχεί σε μια ραδιενεργό διάσπαση ανά δευτερόλεπτο

**(Bq = 1 διάσπαση / s)**, το οποίο όμως είναι μικρή μονάδα γι' αυτό χρησιμοποιούνται τα πολλαπλάσιά του όπως το kBq =  $10^3$  Bq, το MBq =  $10^6$  Bq και το TBq =  $10^{12}$ Bq. Μετράει δηλαδή το ρυθμό διασπάσεων ενός ραδιοϊσοτόπου. Η αρχική μονάδα μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε για να εκφράσει την διάσπαση ραδιενεργών υλικών είναι το **Curie** και είναι ίσο με την ποσότητα ραδιενεργού υλικού στο οποίο ο αριθμός των ατόμων που διασπώνται ανά δευτερόλεπτο ισούται με 37 δις και βασίζεται στον ρυθμό διάσπασης των ατόμων σε ένα γραμμάριο Ραδίου (Ci,  $1\text{Ci} = 3,7 \cdot 10^{10}$  Bq). Είναι μεγάλη μονάδα και γι' αυτό χρησιμοποιούνται τα υποπολλαπλάσιά του όπως το  $1\text{mCi} = 10^{-3}$  Ci και  $1\mu\text{Ci} = 10^{-6}$  Ci.

Για να εκτιμήσουμε ποσοτικά τα αποτελέσματα της επίδρασης της ακτινοβολίας, θεσπίστηκε αρχικά μια μονάδα ακτινοβολίας, η οποία ονομάστηκε **απορροφούμενη δόση rad (= radiaton absorbed dose)**. Αυτή εκφράζει τη δόση ραδιενέργειας ή γενικότερα την ποσότητα ακτινοβολίας, η οποία αποθέτει 1J ενέργειας ανά χιλιόγραμμο μάζας ιστού που την απορροφά <sup>[6]</sup>. Η μονάδα αυτή είναι το **Gray (Gy = 1 Joule / kg)** που αντιστοιχεί σε απορρόφηση ακτινοβολίας ενέργειας 1J ανά χιλιόγραμμο μάζας ιστού,  $1\text{Gy} = 100$  rad, δηλαδή είναι **η ενέργεια που εναποτίθεται ανά μονάδα μάζας**. Δεδομένου ότι η απορροφώμενη δόση ενός Gy είναι μεγάλη ως προς τις βιολογικές επιπτώσεις , χρησιμοποιούνται στην πράξη τα υποπολλαπλάσια του:  $1\text{mGy} = 0,001$  Gy,  $1\mu\text{Gy} = 0,000001$  Gy.

- 1 sievert = 100 rem
- 1 becquerel =  $2.7 \times 10^{-11}$  curie
- 1 gray = 100 rads
- 1 curie =  $3.7 \times 10^{10}$  διασπάσεις /sec
- 1 rad = 0.01 Gy

Στις τελευταίες συστάσεις της Διεθνούς Επιτροπής Ακτινοπροστασίας ICRP προτάθηκαν νέες ποσότητες προστασίας από την ακτινοβολία, δηλαδή η ισοδύναμη δόση, η ενεργός δόση και ιδιαίτερα η δεσμευμένη αποτελεσματική δόση η οποία είναι πλέον η κύρια ποσότητα για την αξιολόγηση της ακτινοβολίας του ανθρώπινου σώματος από τα ραδιονουκλίδια.

Η βιολογική επίπτωση (Μ. Αντωνόπουλος – Ντόμης, 2004) εξαρτάται όχι μόνο από την ενέργεια που εναπόθεσε η ραδιενεργός ακτινοβολία, αλλά και από το είδος της ακτινοβολίας. Για παράδειγμα, έστω ότι ένα ποσό απορροφώμενης δόσης από σωματίδια α επιφέρει κάποια βιολογική επίπτωση, για την ίδια βιολογική επίπτωση απαιτείται κατά προσέγγιση εικοσαπλάσια απορροφώμενη δόση από ακτινοβολία γ ή Χ. Για αυτό τον λόγο εισήχθη ο **συντελεστής στάθμισης  $W_R$**  της ακτινοβολίας, ο οποίος δίνει τη σχετική βιολογική δραστηριότητα κάθε συγκεκριμένου είδους ακτινοβολίας, σε σχέση με τη βιολογική δραστηριότητα των ακτίνων γ ή Χ. Η ενεργός δόση ορίζεται ως το γινόμενο της απορροφούμενης δόσης σε Gy επί τον συντελεστή στάθμισης  $W_R$ :

$$\text{(ισοδύναμη δόση)} = \text{(απορροφούμενη δόση)} \cdot W_R$$

όπου η **ισοδύναμη δόση** είναι το μέτρο της διακινδύνευσης από την εναπόθεση της ενέργειας της συγκεκριμένης ακτινοβολίας, δηλαδή η **απορροφούμενη δόση σταθμισμένη για το είδος της ακτινοβολίας** και μετριέται σε **σίβερτ (Sv)**.

Η ίδια ποσότητα ισοδύναμης δόσης δεν επιφέρει τις ίδιες βιολογικές συνέπειες και δεν συνεπάγεται την ίδια διακινδύνευση για τα διάφορα όργανα και τους ιστούς. Ως εκ τούτου χρησιμοποιούμε το μέτρο ενεργός δόση και τον **συντελεστή στάθμισης  $W_T$**  για κάθε ιστό ή όργανο.

$$\text{(ενεργός δόση)} = \text{(ισοδύναμη δόση)} \cdot W_T$$

Η **μέση ενεργός δόση** ενός ατόμου που οφείλεται στις τεχνητές και στις φυσικές πηγές ραδιενέργειας του γήινου περιβάλλοντος, είναι 0,31mSv και 2,4mSv για κάθε χρόνο αντίστοιχα, ενώ η ενεργός δόση που αντιστοιχεί σε μια τυπική ακτινογραφία θώρακος, είναι περίπου 0,02mSv, σύμφωνα με την ΕΕΑΕ. Η ένταση της ραδιενέργειας είναι αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασης από την πηγή της ακτινοβολίας (π.χ. από ένα πυρηνικό



αντιδραστήρα με διαρροή).

Η συνολική δόση των 2,2 mSv ανά έτος οφείλεται κατά 40% σε εξωτερική και κατά 60% περίπου σε εσωτερική έκθεση. Εμφανίζει τυπικό εύρος τιμών απο 1 έως 10 mSv περίπου, ενώ διακυμάνσεις γύρω από τη μέση τιμή αυτών των συνιστωσών των δόσεων με συντελεστές 5 έως 10 δεν είναι ασυνήθιστες.

#### Συγκεντρωτικά:

- **Απορροφούμενη δόση:** είναι η ενέργεια που εναποτίθεται ανά μονάδα μάζας.
- **Ισοδύναμη δόση:** είναι η απορροφούμενη δόση σταθμισμένη για το είδος της ακτινοβολίας.
- **Ενεργός δόση:** είναι η ισοδύναμη δόση σταθμισμένη για την βιολογική επίπτωση της ακτινοβολίας στους διάφορους ιστούς του σώματος <sup>[27]</sup>.

	<i>mSv ανά έτος</i>
<i>Εξωτερικές πηγές</i>	
Κοσμική ακτινοβολία	0,4
Γήινη (ακτίνες γ)	0,5
<i>Εσωτερικές πηγές</i>	
Αναπνοή (κυρίως ραδόνιο)	1,0
Διατροφή	0,3
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>2,2</b>

Σχήμα 5.2. Παγκόσμια μέση τιμή της ενεργού δόσης από φυσική ραδιενέργεια (UNSCEAR 2000)

([http://www.cup.gr/Downloads/PDF/RADIOACTIVITY\\_IV\\_.pdf](http://www.cup.gr/Downloads/PDF/RADIOACTIVITY_IV_.pdf))

Άμεσες σωματικές επιπτώσεις ονομάζονται οι σωματικές επιπτώσεις οι οποίες εμφανίζονται σε άτομα που εκτέθηκαν σε ραδιενέργεια και στις οποίες τα συμπτώματα εμφανίζονται μέσα σε λίγες ώρες ή/και μέχρι 60 περίπου ημέρες από την έκθεση στην ακτινοβολία. Προκύπτουν μόνο από εξαιρετικά έντονη

έκθεση σε ακτινοβολία, συνήθως μεγαλύτερες των 500 mSv σε χρονικό διάστημα μιας μέρας. *Καθυστερημένες σωματικές επιπτώσεις* ονομάζονται οι επιπτώσεις που εμφανίζονται στα άτομα τα οποία εκτέθηκαν στη ραδιενέργεια και εμφανίζονται με καθυστέρηση που κυμαίνεται από ένα μέχρι και τριάντα χρόνια μετά την έκθεση σε έντονη ακτινοβολία.

<i>Δόση (σε mSv)</i>	<i>Πιθανά συμπτώματα</i>
0 - 500	Δεν υπάρχουν παρατηρήσιμα συμπτώματα.
500 - 1000	Ελαφρές αλλαγές στο αίμα. Κανένα άλλο παρατηρήσιμο σύμπτωμα.
1000 - 2000	Έμετος μέσα σε λίγες ώρες, σε 5% έως 50% των περιπτώσεων, με κόπωση και απώλεια ορέξεως. Μέτριες μεταβολές στο αίμα. Σε κάθε περίπτωση επέρχεται ανάρρωση από τα συμπτώματα αυτά μέσα σε λίγες εβδομάδες.
2000 - 6000	Δόση μεγαλύτερη από 3000 mSv προκαλεί, σε κάθε περίπτωση, έμετο σε χρόνο λιγότερο από 2 ώρες. Σοβαρές μεταβολές στο αίμα, που συνοδεύονται από αιμορραγία και αυξανόμενη επιδεκτικότητα σε μόλυνση καθώς αυξάνεται η δόση. Απώλεια των μαλλιών μετά από 2 εβδομάδες, για δόσεις μεγαλύτερες από 3000 mSv. Ανάρρωση από τα συμπτώματα αυτά μέσα σε έναν μήνα έως ένα έτος, στις περισσότερες περιπτώσεις δόσεων κοντά στο όριο των 2000 mSv. Στις περιπτώσεις δόσεων κοντά στο άνω όριο των 6000 mSv, επιβιώνει μόνον το 20% περίπου.
6000 - 10.000	Έμετος μέσα σε μία ώρα, σοβαρές μεταβολές του αίματος, αιμορραγία, μολύνσεις, απώλεια μαλλιών. Σε 80% έως 100% των περιπτώσεων επέρχεται θάνατος μέσα σε 2 μήνες. Μακρότατος χρόνος ανάρρωσης από τα συμπτώματα αυτά όσων επέζησαν.

Σχήμα 5.3. Άμεσες σωματικές επιπτώσεις από ολόσωμη έντονη ακτινοβολία.

([http://www.cup.gr/Downloads/PDF/RADIOACTIVITY\\_IV\\_.pdf](http://www.cup.gr/Downloads/PDF/RADIOACTIVITY_IV_.pdf))

Σύμφωνα με ειδικούς, ο κίνδυνος για καρκίνο αυξάνεται όταν η έκθεση στην ακτινοβολία **ξεπεράσει τα 100mSv το χρόνο** και γίνεται θανατηφόρα αν φτάσει στα **5Sv - 10Sv σε διάστημα μερικών ημερών ακόμα και ωρών**. Η έκθεση **σε 1Sv – 100mSv ακτινοβολίας εκτιμάται ότι αυξάνει τον κίνδυνο θανατηφόρου καρκίνου κατά περίπου 5%**. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι μετρήσεις που είχαν γίνει στην Ιαπωνία, λίγες ημέρες μετά το ατύχημα, γύρω από τους κατεστραμμένους αντιδραστήρες, των οποίων τα επίπεδα της έντασης ήταν γύρω στα 400mSv, δηλαδή τετραπλάσια επίπεδα σε σχέση με αυτά που αυξάνουν τον κίνδυνο για καρκίνο.

## 6 Φορείς καθορισμού προδιαγραφών και ελέγχου της ραδιενέργειας

Αμέσως μετά την ανακάλυψη των ακτίνων X και του ραδίου, οι κίνδυνοι τους ήταν τόσο καλά αναγνωρίσιμοι και οι χρήσεις τους έχουν γίνει τόσο συνηθισμένο φαινόμενο που πλέον υπάρχει σαφής ανάγκη για την ανάπτυξη ενιαίων προτύπων προστασίας από την ακτινοβολία. Οι σχετικές διεθνείς επιτροπές που έχουν ιδρυθεί έχουν καθορίσει τα επιτρεπόμενα όρια για κάθε ιστό και κάθε ραδιονουκλίδιο. Οι αλλαγές στα επιστημονικά δεδομένα τα τελευταία χρόνια για τη ραδιενέργεια δεν είναι σημαντικές. Η **Διεθνής Επιτροπή Ακτινοπροστασίας ICRP** (International Commission on Radiological Protection) <sup>[28]</sup> είναι μια ανεξάρτητη, διεθνής, μη κυβερνητική οργάνωση η οποία παρέχει συστάσεις και κατευθύνσεις σχετικά με την προστασία από την ακτινοβολία. Ιδρύθηκε το 1928 κατά το δεύτερο διεθνές συνέδριο Ακτινολογίας στη Στοκχόλμη της Σουηδίας και τότε ονομαζόταν Διεθνής Επιτροπή Προστασίας από τις Ακτίνες X και το Ράδιο (International X-ray and Radium Protection Committee ICRP). Το 1950 αναδιαρθρώθηκε για να ληφθούν υπόψη οι νέες χρήσεις της ακτινοβολίας εκτός του ιατρικού τομέα και της δόθηκε το σημερινό όνομα. Η επιτροπή αυτή εξακολουθεί να υφίσταται και περιλαμβάνει 13 μέλη και 4 επιτροπές που έχουν συνολικά περίπου 40 εμπειρογνώμονες από 14 χώρες.

*Η ICRP κατέχει πλέον σημαντική θέση στον τομέα της προστασίας από την ακτινοβολία και τα τελευταία χρόνια έχει λάβει οικονομική στήριξη από την Παγκόσμια Οργάνωση Υγείας (World Health Organization) και άλλους διεθνείς και εθνικούς οργανισμούς.* Ενώ η Διεθνής Επιτροπή Ακτινοπροστασίας ICRP έχει διατηρήσει τις τρεις θεμελιώδεις αρχές, **την αιτιολόγηση, τη βελτιστοποίηση της προστασίας και τον περιορισμό των δόσεων σε ραδιενέργεια** (ICRP 60, 1991), έχει παράλληλα επιχειρήσει να αναπτύξει μια πιο ολιστική προσέγγιση για την προστασία από τις ακτινοβολίες που καλύπτει όλες τις εκτεθειμένες περιπτώσεις, σχεδιασμένες, υφιστάμενες ή επείγουσες, είτε από φυσική είτε από τεχνητή προέλευση. Η προσέγγιση αυτή θα πρέπει να διασφαλίζει ότι η προσοχή είναι επικεντρωμένη σε αυτές τις εκθέσεις

ραδιενέργειας οι οποίες μπορούν εύλογα να ελεγχθούν.

**\* Αρχή της αιτιολόγησης:** κάθε εφαρμογή που ενέχει έκθεση σε ιονίζουσα ακτινοβολία, πρέπει να αποφέρει ικανοποιητικό όφελος στα εκτιθέμενα άτομα ή στο κοινωνικό σύνολο, έτσι ώστε να αντισταθμίζεται η πιθανή βλάβη την οποία αυτή μπορεί να προκαλέσει.

**\* Αρχή της βελτιστοποίησης:** όλες οι πηγές και τα μηχανήματα παραγωγής ακτινοβολιών πρέπει να προσφέρουν κάτω από τις επικρατούσες συνθήκες λειτουργίας τους, την καλύτερη δυνατή προστασία και ασφάλεια, έτσι ώστε το μέτρο της ενεχόμενης έκθεσης, η πιθανότητα μη αναμενόμενης έκθεσης και ο αριθμός των εκτιθεμένων ατόμων, να είναι τόσο μικρά όσον αυτό είναι λογικά εφικτό, λαμβάνοντας υπόψη οικονομικούς και κοινωνικούς παράγοντες.

**\* Αρχή των ορίων δόσεων:** Οι ατομικές εκθέσεις σε ακτινοβολία, οι οφειλόμενες στο σύνολο των πηγών στα πλαίσια των εγκεκριμένων πρακτικών, πρέπει να υπόκεινται σε όρια δόσεων ή όρια κινδύνων, η υπέρβαση των οποίων θεωρείται μη αποδεκτή.

**Έχει ενισχύσει επίσης την αρχή της βελτιστοποίησης της προστασίας με ιδιαίτερη έμφαση στη χρήση των περιορισμών για τις προγραμματισμένες καταστάσεις έκθεσης και τα επίπεδα αναφοράς για τις υφιστάμενες και επείγουσες καταστάσεις έκθεσης.** Οι περιορισμοί δόσης και τα επίπεδα αναφοράς της ραδιενέργειας, κατηγοριοποιούνται σε τρεις ζώνες και δίνονται από τη Διεθνή Επιτροπή Ακτινοπροστασίας. Το Διεθνές Σύστημα Προστασίας από τις Ακτινοβολίες έχει αναπτυχθεί επίσης από το ICRP με βάση την τρέχουσα κατανόηση της επιστήμης των εκθέσεων σε ακτινοβολία και τα αποτελέσματα καθώς και τις κρίσεις οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τις κοινωνικές προσδοκίες, την ηθική και την εμπειρία που αποκτήθηκε κατά την εφαρμογή του συστήματος <sup>[29]</sup>.

Ακόμη ένας φορέας είναι το **Εργαστήριο Βαθμονόμησης Οργάνων Ιονιζουσών Ακτινοβολιών (ΕΒΟΙΑ)** έχει αναπτύξει και τηρεί τα εθνικά δοσιμετρικά μεγέθη αναφοράς (Gy, Sv, Cb/kg) ιονιζουσών ακτινοβολιών ( $\gamma$ , X και  $\beta$ ) και διενεργεί βαθμονομήσεις οργάνων μέτρησης ακτινοβολιών σε Air Kerma, Απορροφούμενη Δόση, Ατομικό Ισοδύναμο Δόσης βάθους 10 mm,

Hr(10), και 0,07 mm, Hr(0,07), Περιβαλλοντικό Ισοδύναμο Δόσης βάθους 10 mm, H\*(10) και Έκθεση στα πεδία της ακτινοθεραπείας, διαγνωστικής ακτινολογίας, μαστογραφίας, ακτινοπροστασίας και ατομικής δοσιμέτρησης εργαζομένων. Το ΕΒΟΙΑ συνεργάζεται επίσης με το Εθνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας (ΕΙΜ) και αποτελεί το Εθνικό Εργαστήριο Μετρολογίας Ιονιζουσών Ακτινοβολιών.

Οι πρώτες προσπάθειες για την ανάπτυξη ασφαλών πρακτικών (Eisebud, 1987) παρεμποδίστηκαν λόγω της πρωτόγονης έννοιας της δόσης. Αρχικά, η δόση ακτινοβολίας ήταν συνδεδεμένη με τη διάρκεια του χρόνου που χρειάστηκε για μία δεδομένη ροή ακτινοβολίας για την παραγωγή ερυθρότητας στο δέρμα. Η μέγιστη επιτρεπτή έκθεση των εργαζομένων σε ακτινοβολία κατά τη διάρκεια οποιουδήποτε μήνα υιοθετήθηκε να είναι 1/1000 του ποσού της ακτινοβολίας που θα παράγει ερυθρότητα σε μια οξεία έκθεση. Όταν προτάθηκαν οι πρώτες προδιαγραφές προστασίας από την ακτινοβολία, ο συνολικός πληθυσμός σε κίνδυνο αποτελούνταν από μερικές χιλιάδες εργαζόμενους που έρχονταν σε επαφή με ακτίνες Χ και ράδιο. Μέχρι εκείνη τη στιγμή ο κίνδυνος θεωρούνταν να οφείλεται εξ' ολοκλήρου στην εξωτερική ακτινοβολία, αν και άγνωστο στους τότε επιστήμονες, ότι ένας αριθμός των εργαζομένων στη βιομηχανία είχαν ήδη απορροφήσει το ράδιο σε ποσότητες που επρόκειτο να αποδειχθούν θανατηφόρες για πολλούς από αυτούς. Το γεγονός ότι οι ιονίζουσες ακτινοβολίες θα μπορούσαν να παράγει γενετικές μεταλλάξεις δεν ήταν επαρκώς αναγνωρισμένες μέχρι τότε. Η ανάγκη να αναπτυχθούν όρια επιτρεπόμενης έκθεσης σε εσωτερικές πηγές εκπομπής ραδιενέργειας, άρχισε να προκύπτει στα τέλη της δεκαετίας του 1920, όταν έγινε γνωστό ότι ο καρκίνος των οστών είχε αναπτυχθεί μεταξύ των εργαζομένων που εφάρμοζαν το ράδιο στα φωτεινά καντράν που χρησιμοποιούνται σε ρολόγια. Η σύσταση της επιτροπής NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements) ότι το επιτρεπόμενο βάρος του σώματος σε  $^{226}\text{Ra}$  να περιορίζεται σε 0,1  $\mu\text{Ci}$  παραμένει σε ισχύ μέχρι σήμερα, δηλαδή για περισσότερα από 40 χρόνια αφότου προτάθηκε για πρώτη φορά.

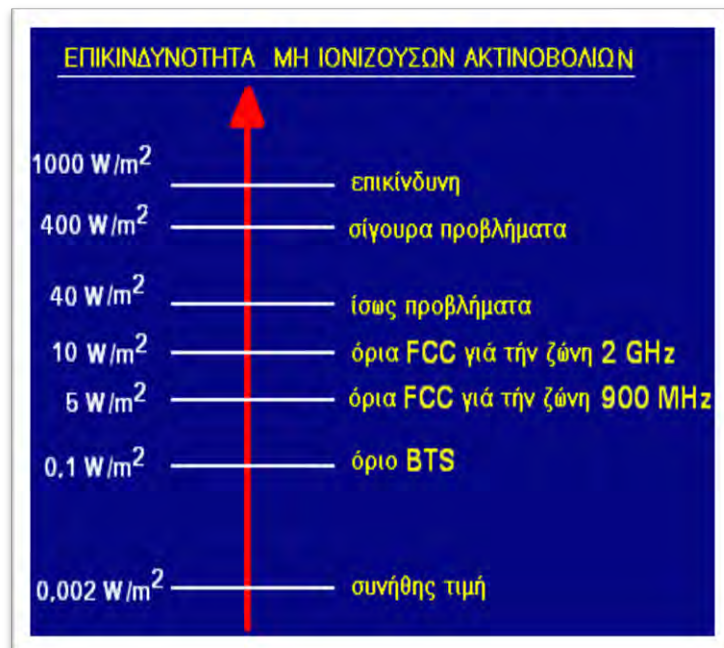
Μια έκθεση σχετικά με τις βιολογικές επιδράσεις των εισπνεόμενων ραδιονουκλιδίων παρασκευάστηκε από τη Διεθνή Επιτροπή Ακτινοπροστασίας και την αξιολόγηση των κινδύνων που συνδέονται με την εισπνοή του πλουτωνίου και άλλων ραδιονουκλιδίων. Η έκθεση αυτή απαριθμούσε τις βιολογικές αποκρίσεις, αναγνώρισε ιστούς και κύτταρα σε κίνδυνο, συντελεστές κινδύνου προερχόμενοι από εισπνεόμενα ραδιονουκλίδια από πειράματα σε ζώα για τη σύγκριση με τα δεδομένα για τον άνθρωπο, ώστε να καθοριστεί μια ίση αναλογία αποτελεσματικότητας για την άλφα ακτινοβολία σε σχέση με τις βήτα και γάμμα.

**Τα κυριότερα μεγέθη των ακτινοβολιών** <sup>[25]</sup> αυτών μετρούνται με μονάδες της ραδιομετρίας, δηλαδή η ισχύς  $P$  της ακτινοβολίας μετρείται με  $W$ , η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  σε  $V/m$ , η ένταση του μαγνητικού πεδίου  $H$  σε  $A/m$ , και το σπουδαιότερο αυτών η πυκνότητα ισχύος  $S$  σε  $W/m^2$  ή συνηθέστερα σε  $mW/m^2$ . Η αποτίμηση όμως των επιπτώσεων της έκθεσης των ζώντων οργανισμών, συμπεριλαμβανομένου και του ανθρώπου, σε μιά μη ιονίζουσα ακτινοβολία για χρόνο  $t$ , γίνεται με βάση τον ρυθμό της απορροφούμενης δόσης **SAR**, για τον οποίο ισχύει ότι **SAR =  $\sigma E^2/2\rho$** . Όπου τα  $\sigma$  και  $\rho$  είναι η ειδική αγωγιμότητα και η πυκνότητα αντιστοίχως των ιστών.

**Η Διεθνής Επιτροπή για την Προστασία από τη Μη - Ιονίζουσα Ακτινοβολία** (International Commission on Non Ionizing Radiation Protection - ICNIRP) είναι μη κυβερνητικός οργανισμός, που αναγνωρίζεται επισήμως από τον **Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας** (World Health Organization - WHO), αποτιμά τα επιστημονικά αποτελέσματα στους τομείς της επιδημιολογίας, της ιατρικής, της βιολογίας, της φυσικής και της μηχανικής σε όλο τον κόσμο και εκδίδει οδηγίες και πίνακες για τὰ αποδεκτά επίπεδα των τιμών των παραπάνω μεγεθών των ακτινοβολιών για τα οποία δεν ενδέχεται να υπάρξουν δυσμενείς επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό.

Στη χώρα μας <sup>[25]</sup> η κινητή τηλεφωνία εκπέμπει στα 900 MHz, στα 1800 MHz και στα 2100 MHz για να αποτρέπεται η παρεμβολή μεταξύ των διαφορετικών ραδιοσημάτων.

Στο δίπλα σχήμα φαίνεται η κλίμακα επικινδυνότητας της πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας, η οποία έχει υιοθετηθεί από τους διεθνείς φορείς τηλεπικοινωνιών και υγείας.



Σχήμα 6.1 Επικινδυνότητα μη ιονίζουσων ακτινοβολιών.

(<http://users.sch.gr/xtsamis/OkosmosMas/Aktinovolies/Aktinovolies.htm>)

Ο νόμος 3431/2006 επιβάλλει περιορισμούς σχετικά με όρους εγκατάστασης κεραιών κινητής τηλεφωνίας καθορίζοντας μάλιστα σαν ανώτατα όρια το 70% των ορίων της ICNIRP, ενώ αν σε απόσταση μικρότερη από 300 μέτρα υπάρχουν βρεφονηπιακοί σταθμοί, σχολεία, γηροκομεία, ή νοσοκομεία, τα επίπεδα έκθεσης του κοινού απαγορεύεται να υπερβαίνουν το 60% των ορίων της ICNIRP. Δηλαδή εφαρμόζονται ακόμα αυστηρότερα όρια σε σχέση με αυτά που ορίζονται από την ICNIRP, όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί. (Στις παρενθέσεις είναι οι τιμές που αντιστοιχούν στο 60%).



Εφαρμογή	Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου (V/m)	Ένταση Μαγνητικού Πεδίου (A/m)	Πυκνότητα Ισχύος Ισοδύναμου Επίπεδου ΗΜ Κύματος (W/m <sup>2</sup> )
Κινητή τηλεφωνία 900 MHz (GSM)	28.7 (24.6)	0.08 (0.066)	3.15 (2.7)
Κινητή τηλεφωνία 1800 MHz (DCS)	40.6 (34.8)	0.11 (0.096)	6.3 (5.4)
Κινητή τηλεφωνία 2100 MHz (UMTS)	42.7 (36.6)	0.11 (0.096)	7 (6)
Ασύρματα δίκτυα 2.4 GHz (WiFi)	42.7 (36.6)	0.11 (0.096)	7 (6)
Ασύρματα δίκτυα 3.5 GHz (WiMax)	42.7 (36.6)	0.11 (0.096)	7 (6)

Σχήμα 6.2. Όρια εγκατάστασης κεραιών κινητής τηλεφωνίας.

<http://users.sch.gr/xtsamis/OkosmosMas/Aktinovolies/Aktinovolies.htm>

## 6.1 Όρια δόσεων για τη ραδιενέργεια

Τα όρια δόσεων έχουν ως βασικότερο σκοπό την προστασία των ανθρώπων από τις ιονίζουσες ακτινοβολίες και τις επιπτώσεις που αυτές επιφέρουν. Η βασική αρχή της ακτινοπροστασίας (Αντωνόπουλος – Ντόμης, 2004), για οποιαδήποτε πρακτική με ιονίζουσες ακτινοβολίες είναι η αρχή του **ALARA** (*As Low As Reasonably Achievable* = *Τόσο Μικρή Όσο είναι Λογικά Εφικτό*) σύμφωνα με την οποία πρέπει να επιδιώκεται να τηρούνται οι τιμές ανώτατων ορίων δόσεων, λαμβάνοντας υπ' όψη τους οικονομικούς και κοινωνικούς παράγοντες. Αυτό σημαίνει ότι οι δόσεις από ιονίζουσες ακτινοβολίες στις οποίες υπόκεινται οι άνθρωποι σε ατομικό επίπεδο, οι επιπλέον από φυσική ραδιενέργεια, δεν επιτρέπεται να υπερβαίνουν κάποια ανώτατα όρια τιμών. Η υπέρβαση των ορίων δόσεων ή ορίων κινδύνων θεωρείται μη αποδεκτή και άκρως επιβλαβής. *Παράλληλα, κάθε δραστηριότητα που συνοδεύεται από έκθεση σε ραδιενέργεια, πρέπει να τεκμηριώνεται ως προς την αναγκαιότητα της έκθεσης καθώς και το αναμενόμενο όφελος από αυτήν στον εκτιθέμενο ή στο κοινωνικό σύνολο, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση των ιατρικών εφαρμογών.* Επίσης, στα πλαίσια της βελτιστοποίησης της ακτινοπροστασίας του ασθενούς, εφαρμόζονται τα Διαγνωστικά Επίπεδα Αναφοράς (ΔΕΑ) για τυποποιημένες εξετάσεις ομάδων ασθενών κανονικής διάπλασης για ευρέως χρησιμοποιούμενους τύπους εξοπλισμού και καθορίζονται σε εθνικό επίπεδο <sup>[30]</sup>.

Αρχικά, οφείλουμε να αναφέρουμε ότι δεδομένα συσχέτισης δόσεων και βιολογικών επιπτώσεων υπάρχουν για μεγάλες δόσεις όπως παρατηρήθηκαν αυτά όσων επέζησαν από τα πυρηνικά ατυχήματα, τους ακτινολόγους και τους ασθενείς που εκτίθενται σε ακτινοβολίες. Για μικρές δόσεις, κάτω των ορίων, δεν υπάρχουν τεκμηριωμένες βιολογικές επιπτώσεις. Όρια αποτελούν και οι δόσεις από τη φυσική ραδιενέργεια στο περιβάλλον, στο οποίο έζησε και εξελίχθηκε ο άνθρωπος. Όπως προαναφέραμε, τα όρια θεσμοθετούνται από τη Διεθνή Επιτροπή Ακτινοπροστασίας (ICRP), σύμφωνα με τα οποία λειτουργούν και εξελίσσονται τα κράτη. Αξίζει να αναφέρουμε ότι ο κίνδυνος από τη ραδιενέργεια αποτελείται από τρεις κατηγορίες, τον μη αποδεκτό στον οποίο θέτονται τα όρια δόσεων, τον ανεκτό ο οποίος αποτελεί περιοχή

βελτιστοποίησης και τον αποδεκτό στον οποίο δε γίνεται περαιτέρω μείωση της δόσης αφού θεωρείται ότι δεν προκαλεί βλάβες στον ανθρώπινο οργανισμό <sup>[27]</sup>.

Στην Ελλάδα και στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η νομοθεσία προβλέπει όρια για τρεις κατηγορίες του πληθυσμού: τους **«εκτιθέμενους εργαζόμενους»**, τους **«μαθητευόμενους και σπουδαστές»** και το **«ευρύ κοινό»** (Αντωνόπουλος – Ντόμης, 2004). Για τους εργαζόμενους τα όρια είναι **20 mSv κατά τη διάρκεια ενός έτους και 100 mSv κατά τη διάρκεια 5 συνεχόμενων ετών**. Για την εγκυμονούσα εργαζόμενη γυναίκα πρέπει να λαμβάνονται επιπλέον μέτρα έτσι ώστε η έκθεση της να είναι τόσο χαμηλή όσο είναι λογικά εφικτό και να μην υπερβαίνει σε καμία περίπτωση το **1 mSv**. Για τους μαθητευόμενους ηλικίας 16 έως 18 ετών τα όρια είναι **6 mSv κατά τη διάρκεια ενός έτους ενώ για τους άνω των 18 ετών ισχύουν τα ίδια όρια με αυτά των εργαζομένων**. Για μεμονωμένα άτομα του ευρέος κοινού τα όρια είναι **1 mSv κατά τη διάρκεια ενός έτους**.

Εκτός από τα όρια της ολόσωμης δόσης, έχουν καθοριστεί και **όρια ενεργού δόσεις για επιμέρους όργανα του ανθρώπινου οργανισμού**. Για παράδειγμα, για το ευρύ κοινό το όριο της ενεργού δόσεις για τον φακό των οφθαλμών είναι 15 mSv ανά έτος και 50 mSv για το δέρμα, ενώ για τους εργαζόμενους τα αντίστοιχα όρια είναι 150 mSv και 500 mSv.

Με βάση τον Κανονισμό Ακτινοπροστασίας «Σε οποιαδήποτε περίπτωση κατά την οποία η ενεργός δόση που έλαβε ο επαγγελματικά εκτιθέμενος υπερβαίνει τα 6 mSv ανά έτος, ο υπεύθυνος ακτινοπροστασίας πρέπει να διερευνήσει τα αίτια και να προτείνει, ενδεχόμενα, τη λήψη κατάλληλων μέτρων και παράλληλα να υποβάλλει ιεραρχικά γραπτή έκθεση στην ΕΕΑΕ.

Η πιθανότητα θανάτου σε ένα άτομο ή στους απογόνους του σύμφωνα με έρευνα της Διεθνούς Επιτροπής Ακτινοπροστασίας (ICRP, Report 60, 1991) για ολόσωμη ακτινοβόληση ανά Sv είναι:

→  $7.3 \cdot 10^{-2}$  για τον γενικό πληθυσμό

→  $5.6 \cdot 10^{-2}$  για τους εργαζόμενους σε περιβάλλον ραδιενέργειας,

με παραδοχές ότι η συχνότητα εξαρτάται γραμμικά από τη συνολική δόση, δεν υπάρχει κατώφλι δόσης και είναι ανεξάρτητη του ρυθμού δόσης.

	Εργαζόμενοι (mSv/έτος)	Πληθυσμός (mSv/έτος)
Ολόσωμη δόση	20 Κατά μέσο όρο σε 5 έτη	1
Φακός ματιού	150	15
Δέρμα	500	50
Άκρα	500	

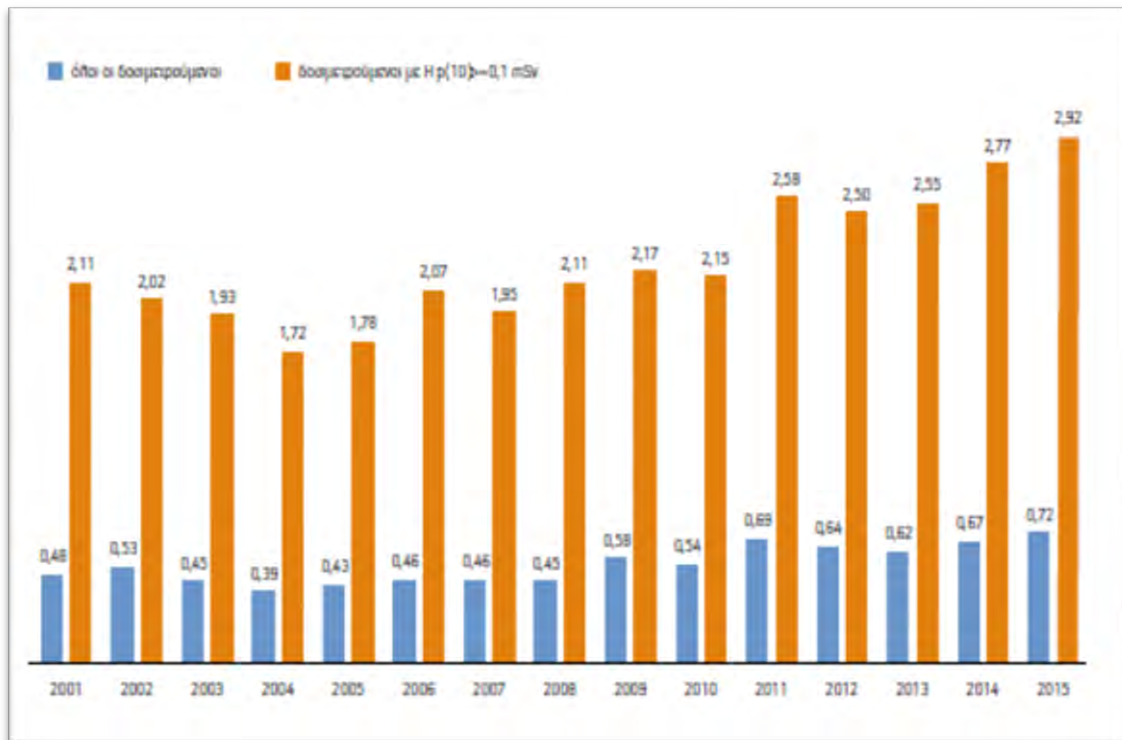
Σχήμα 6.1.1. Πρωτεύοντα όρια δόσεων  
(ICRP 60, 1991, οδηγία 96/29 Euratom, ΦΕΚ 2001)

Όσον αφορά τις ιατρικές πρακτικές της ραδιενέργειας, ο ασθενής είναι ο άμεσος αποδέκτης του οφέλους από την εξέταση άρα η έκθεση είναι συμβατή, με την προϋπόθεση ότι διατηρούνται τα αποδεκτά όρια έκθεσης. Οφείλεται όμως στα πλαίσια της εξέτασης ή της θεραπείας του ασθενούς να υπάρχει πλήρης ενημέρωση, κλινική αιτιολόγηση της χρήσης της ραδιενέργειας αλλά και τα οφέλη που θα προκύψουν από αυτή.

Εξέταση	Ενεργός δόση (mSv)
Θώρακος	0.04
Θώρακος CT	7.8
Κρανίου	0.1
Κρανίου CT	1.8
Κοιλίας	1.2
Κοιλίας CT	7.6
Λεκάνης	1.1
Λεκάνης CT	7.1

Σχήμα 6.1.2. όρια δόσεων για τις ιατρικές πρακτικές (ICRP 60, 1990)

Το σύνολο αυτών των ορίων αφορά μόνο τις δόσεις από πηγές που δεν ανήκουν στη φυσική ραδιενέργεια ή για δραστηριότητες που επιφέρουν τεχνητή αύξηση της φυσικής ραδιενέργειας. Σε περιπτώσεις όμως χωρών στις οποίες παρατηρούνται αυξημένα επίπεδα φυσικής ραδιενέργειας σε κατοικίες ή χώρους εργασίας, είναι απαραίτητη η λήψη μέτρων και ορίων δόσεων και για τη φυσική ραδιενέργεια.



Σχήμα 6.1.3. Εξέλιξη του μέσου ετήσιου ατομικού ισοδύναμου δόσης βάθους 10 mm (mSv) στο διάστημα 2001-2015. (EEAE, annual report 2015)

Ως προς την πρόσληψη μέσω εισπνοής (R. Τγκνα, J. Sabol 1995), οι τιμές μειώνονται με τη μείωση της ηλικίας της εισπνοής κατά περίπου 5% για τα παιδιά σε σύγκριση με τους ενήλικες και 50% για τα βρέφη. Επίσης, στην περίπτωση της εισπνοής η μεγαλύτερη συμβολή είναι από το  $^{210}\text{Po}$  ραδιονουκλίδιο. Οι δόσεις για τους ενήλικες από την αναφορά των ετήσιων προσλήψεων των μακράς διάρκειας ζωής σειρών ραδιονουκλιδίων, μπορεί να συγκριθεί με τις νέες εκτιμώμενες ετήσιες δόσεις από την έκθεση UNSCEAR (1988) με τους νέους συντελεστές στάθμισης ιστού από το ICRP. Για ραδιονουκλίδια των οικογενειών ουρανίου και θορίου, οι δόσεις είναι 80  $\mu\text{Sv}$  λόγω της ετήσιας πρόσληψης και 92  $\mu\text{Sv}$  ανά έτος από τη μέση περιεκτικότητα του σώματος. Για το κάλιο  $^{40}\text{K}$  οι ίδιες δόσεις είναι περίπου 165  $\mu\text{Sv}$  και 180  $\mu\text{Sv}$  αντίστοιχα. Η συνολική δόση είναι 245  $\mu\text{Sv}$  από την πρόσληψη και 272  $\mu\text{Sv}$  από την περιεκτικότητα του σώματος.

Αν και περισσότερα από είκοσι διαφορετικά κοσμογενετικά ραδιονουκλίδια έχουν ταυτοποιηθεί, μόνο τέσσερα από αυτά μπορούν να θεωρηθούν "απειλή" όσον αφορά την έκθεση του ανθρώπου:  $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$  και  $^{22}\text{Na}$ . Η μεγαλύτερη συμβολή από κοσμογενετικό ραδιονουκλίδιο στην ανθρώπινη δόση προέρχεται από τον άνθρακα  $^{14}\text{C}$ . Η πρόσληψη άνθρακα μέσω της διατροφής στους ενήλικες είναι περίπου 95 kg ανά έτος το οποίο είναι ισοδύναμο με περίπου  $20 \text{ kBq}\cdot\text{y}^{-1}$  κατά μέσο όρο που εισέρχεται στο σώμα. Αυτή η ετήσια κατανάλωση αντιστοιχεί στη δεσμευμένη αποτελεσματική δόση των περίπου 12  $\mu\text{Sv}$ . Η συνεισφορά του  $^{22}\text{Na}$  είναι πολύ μικρότερη, μόνο 0.15  $\mu\text{Sv}$ , και τα υπόλοιπα δύο ραδιονουκλίδια είναι ακόμη λιγότερο σημαντικά όσον αφορά την έκθεση από φυσικές πηγές ακτινοβολίας.

Source of Irradiation	Effective Dose Equivalent ( $\mu\text{Sv/y}$ )		
	External	Internal	Total
<b>Cosmic rays</b>			
Ionizing component	300		300
Neutron component	55		55
<b>Cosmogenic radionuclides</b>		15	15
<b>Primordial radionuclides</b>			
$^{40}\text{K}$	150	180	330
$^{87}\text{Rb}$		6	6
$^{238}\text{U}$ series:	100	1240	1340
$^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{U}$		5	5
$^{230}\text{Th}$		7	7
$^{226}\text{Ra}$		7	7
$^{222}\text{Rn} \rightarrow ^{214}\text{Po}$		1100	1100
$^{210}\text{Pb} \rightarrow ^{210}\text{Po}$		120	120
$^{232}\text{Th}$ series:	160	180	340
$^{232}\text{Th}$		3	3
$^{228}\text{Ra} \rightarrow ^{224}\text{Ra}$		13	13
$^{220}\text{Rn} \rightarrow ^{208}\text{Tl}$		160	160
<b>Total (rounded)</b>	<b>800</b>	<b>1600</b>	<b>2400</b>

Σχήμα 6.1.4. Εκτιμώμενη κατά κεφαλήν ετήσια ισοδύναμη αποτελεσματική δόση από φυσικές πηγές ακτινοβολίας σε περιοχές με φυσιολογικά επίπεδα ραδιενέργειας (UNSCEAR 1988)

(Richard Tykva, Josef Sabol, Low-Level Environmental Radioactivity)

Radionuclide	Dose Coefficient ( $\mu\text{Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$ )					
	Ingestion			Inhalation		
	Adults	Children	Infants	Adults	Children	Infants
$^{238}\text{U}$	0.036	0.059	0.15	31	50	130
$^{234}\text{U}$	0.039	0.065	0.17	35	56	150
$^{230}\text{Th}$	0.076	0.10	0.20	51	74	170
$^{226}\text{Ra}$	0.22	0.35	0.91	2.1	4.7	14
$^{210}\text{Pb}$	0.86	1.1	2.5	2.2	2.8	6.3
$^{210}\text{Po}$	0.21	0.48	1.5	1.0	2.4	7.2
$^{232}\text{Th}$	0.37	0.43	0.64	210	260	440
$^{228}\text{Ra}$	0.27	0.40	1.1	1.1	2.3	6.7
$^{228}\text{Th}$	0.067	0.13	0.38	66	120	370
$^{235}\text{U}$	0.038	0.063	0.16	33	52	130
$^{231}\text{Pa}$	1.4	1.8	2.6	160	220	370
$^{227}\text{Ac}$	2.2	2.7	5.4	280	410	1000

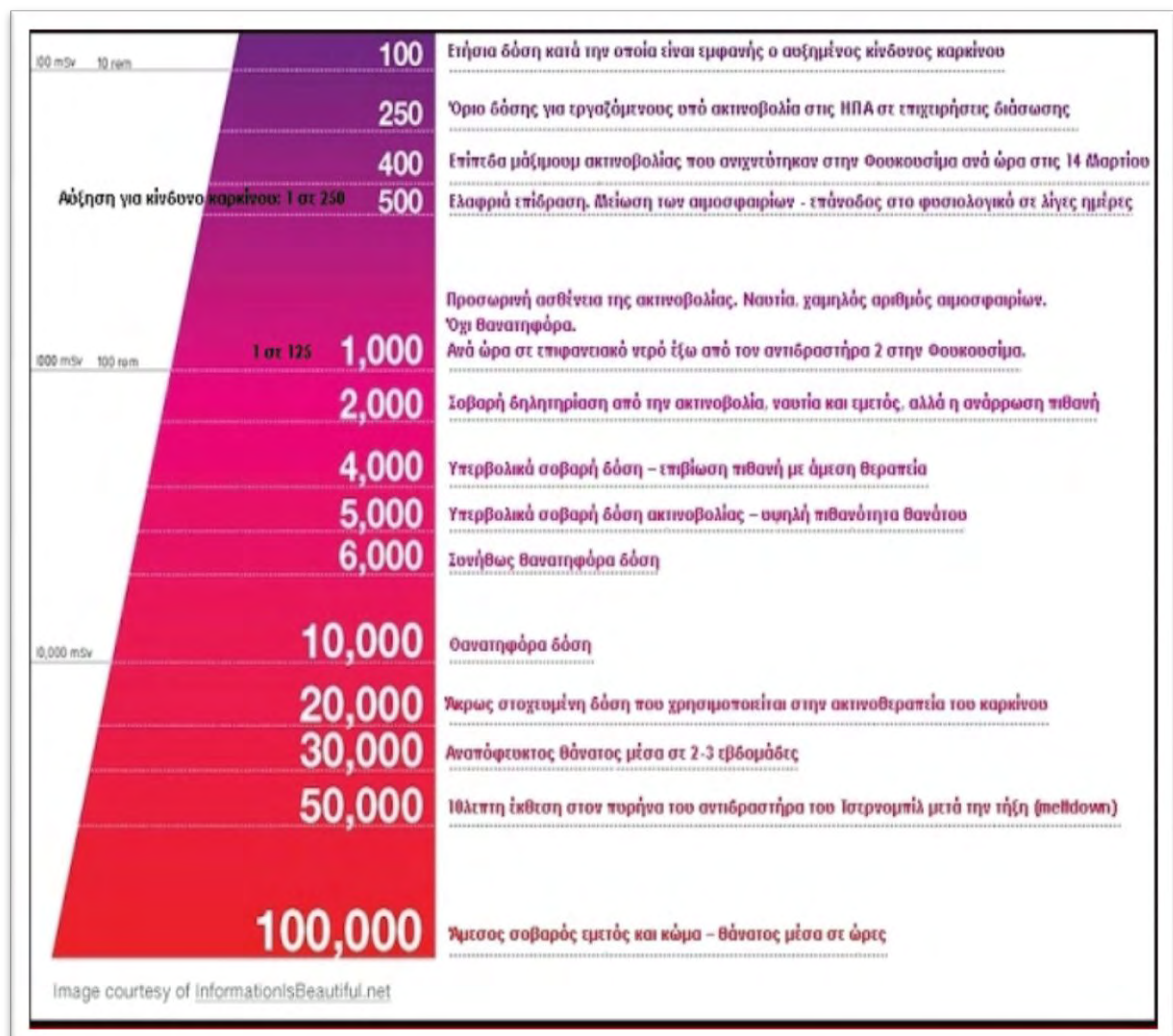
Σχήμα 6.1.5. Δεσμευμένη αποτελεσματική δόση ανά μονάδα πρόσληψης των φυσικών ραδιονουκλιδίων.

(Richard Tykva, Josef Sabol, Low-Level Environmental Radioactivity)



Στον πίνακα που ακολουθεί <sup>[31]</sup> δίνονται οι επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό για κάθε δόση ραδιενέργειας σε millisievert. Κάποια στοιχεία που δεν περιλαμβάνονται είναι τα εξής:

- Κάθε οδοντιατρική ακτινογραφία είναι 0,4 millisievert.
- Η ακτινογραφία θώρακος είναι 0,6 millisievert.
- Η ακτινοβολία του περιβάλλοντος είναι 2,4 millisievert το χρόνο.
- Τα πληρώματα των αεροπλάνων σε υπεραντλαντικές πτήσεις δέχονται 9 millisievert το χρόνο.
- Η αξονική τομογραφία είναι 10 millisievert.
- Το κάπνισμα 1,5 πακέτου την ημέρα είναι 13 millisievert το χρόνο.



Σχήμα 6.1.6. Αποτελέσματα της ακτινοβολίας στον άνθρωπο. ([http://live-sustainably.blogspot.gr/2011/05/blog-post\\_30.html](http://live-sustainably.blogspot.gr/2011/05/blog-post_30.html))

Συγκεκριμένα:

- Στα 500 millisieverts έχουμε μη ορατά αποτελέσματα.
- Στα 75 έως 1.000 millisieverts παρουσιάζονται σύντομες περιόδους ναυτίας κατά την ημέρα της έκθεσης στο περίπου 10% των εκτεθειμένων.
- Στα 2.000 millisieverts, έως και το 50% των ατόμων που προσλήφθηκαν με ραδιενέργεια μπορεί να αισθανθούν μερικά από τα συμπτώματα της ασθένειας της ακτινοβολίας. Παρά το γεγονός ότι μόνο το 5% έως το 10% ενδέχεται να απαιτήσει ιατρική φροντίδα, δεν αναμένονται θάνατοι.
- Στα 4500 millisieverts, εμφανίζεται σοβαρή ασθένεια ακτινοβολίας στα περισσότερα μέλη και ακολουθείται από το θάνατο περίπου του 50% σε δύο έως τέσσερις εβδομάδες.
- Στα 6.000 millisieverts, εμφανίζεται σοβαρή ασθένεια ακτινοβολίας σε όλα τα μέλη της ομάδας που ακολουθείται από το θάνατο σχεδόν όλων των μελών μέσα σε μία έως τρεις εβδομάδες.

Αναφέρουμε ότι η ασθένεια της ακτινοβολίας (radiation sickness) είναι το σύνολο των επιπτώσεων στην υγεία από την τυχαία ή σκόπιμη (η ακτινοβολία που χρησιμοποιείται από την αλλοπαθητική ιατρική ως θεραπεία για τον καρκίνο) έκθεση σε ιοντίζουσα ακτινοβολία. Τα συμπτώματα στα πλαίσια της έρευνας αυτής μπορεί να είναι: αιμορραγία από τη μύτη, το στόμα, τα ούλα, και το ορθό, αίμα στα κόπρανα, μώλωπες, αφυδάτωση, διάρροια, λιποθυμία, κόπωση, απώλεια μαλλιών, φλεγμονή των εκτεθειμένων περιοχών (ερυθρότητα, ευαισθησία, οίδημα, αιμορραγία), στοματικά έλκη, ναυτία και εμετός, ανοιχτές πληγές στο δέρμα, εγκαύματα του δέρματος (κοκκίνισμα, φουσκάλες), απόρριψη νεκρών τμημάτων του δέρματος, έλκη στον οισοφάγο, το στομάχι ή τα έντερα, εμετός αίματος, αδυναμία.

## 7 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΠΟ ΤΗ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η ακτινοβολία είναι πλέον μέρος της ζωής μας. Ακτινοβολία υποβάθρου που προέρχεται κυρίως από φυσικά ορυκτά, είναι γύρω μας όλη την ώρα. Ευτυχώς, είναι πολύ λίγες οι περιπτώσεις όπου ο μέσος άνθρωπος εκτίθεται σε ανεξέλεγκτες πηγές ακτινοβολίας πέρα του υποβάθρου. Παρ'όλα αυτά είναι συνετό να είναι προετοιμασμένος, συνειδητοποιημένος και να γνωρίζει πως να συμπεριφερθεί εάν προκύψει μια τέτοια κατάσταση <sup>[10]</sup>.

Η ραδιοπροστασία είναι το σύνολο των μεθόδων (φυσικών, χημικών, βιολογικών, ιατρικών) που χρησιμοποιούνται για την εξάλειψη των δυσμενών επιπτώσεων της ιονίζουσας ακτινοβολίας στον άνθρωπο και στους άλλους ζωντανούς οργανισμούς. Η λήψη μέτρων μετά από έκθεση εξαιτίας πυρηνικού ατυχήματος είναι πάντα πολύπλοκη αφού η προσβολή και αλλοίωση των κυττάρων είναι ταχύτατη. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις μείωσης των επιπτώσεων όπως για παράδειγμα κατά την πρόσληψη ιωδίου-131 από τον θυρεοειδή όπου σε μεγάλες δόσεις συνίσταται η λήψη ιωδίου με τη μορφή δισκίων ιωδιούχου καλίου που απορροφάται από τα κύτταρα του θυρεοειδούς, ώστε να μη χρειάζεται να προσλάβουν το ραδιενεργό ιώδιο-131 που υπάρχει στην ατμόσφαιρα ή σε τροφές λόγω μόλυνσης από ραδιενέργεια. Σχετικά με άλλα ραδιονουκλίδια η προστασία για την υγεία του ανθρώπου εξαρτάται από τη συγκεκριμένη ραδιομόλυνση και απορροφητικότητά τους από το έδαφος και τις τροφές που θα παραχθούν από τα αναπτυσσόμενα φυτά. Σε σοβαρές περιπτώσεις ραδιενέργειας επιβάλλεται ακόμη και η απομάκρυνση του επιφανειακού στρώματος εδάφους με την προϋπόθεση ότι δεν έχουν εισχωρήσει σε μεγάλο βάθος τα διάφορα ραδιονουκλίδια.

Ένας από τους καλύτερους τρόπους για να προετοιμαστεί είναι να κατανοήσει κανείς τις αρχές ακτινοπροστασίας του χρόνου, της απόστασης και της θωράκισης. Κατά τη διάρκεια ενός ραδιενεργού ατυχήματος, δηλαδή μιας μεγάλης διαρροής ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον, είναι χρήσιμο να χρησιμοποιήσει κανείς αυτές τις αρχές για να προστατεύσει τον ίδιο και την οικογένειά του.

Ο χρόνος, η απόσταση και η θωράκιση είναι οι ενέργειες που ελαχιστοποιούν την έκθεση σε ακτινοβολία <sup>[10]</sup>.

\* **Ο χρόνος:** Για τους ανθρώπους που εκτίθενται σε ακτινοβολία, εκτός του φυσικού υποβάθρου, ο περιορισμός και η ελαχιστοποίηση του χρόνου έκθεσης μειώνει τη δόση ακτινοβολίας που λαμβάνει.

\* **Η απόσταση:** Ακριβώς όπως η θερμότητα από τη φωτιά μειώνεται καθώς απομακρύνεται κανείς από κοντά της, έτσι και η δόση της ακτινοβολίας μειώνεται δραματικά καθώς αυξάνεται η απόσταση από την πηγή της.

\* **Η θωράκιση:** Εμπόδια μολύβδου, σκυρόδεμα ή το νερό παρέχουν προστασία από τη διείσδυση των ακτίνων γάμμα και Χ. Αυτός είναι και ο λόγος που ορισμένα ραδιενεργά υλικά αποθηκεύονται κάτω από το νερό ή σε σκυρόδεμα ή σε δωμάτια με επένδυση μολύβδου. Εξού και γιατί οι οδοντίατροι τοποθετούν μια κουβέρτα πάνω σε ασθενείς που κάνουν ακτινογραφίες των δοντιών τους. Ως εκ τούτου, εισάγοντας την κατάλληλη ασπίδα ανάμεσα στον εκτιθέμενο και την πηγή της ακτινοβολίας, μειώνεται σημαντικά ή ακόμα και εξαλείφεται η δόση που λαμβάνεται.

Όσον αφορά μεγάλης κλίμακας απελευθέρωση ραδιενέργειας, όπως ατύχημα ενός πυρηνικού σταθμού ή τρομοκρατικής ενέργειας, έχουν δοκιμαστεί και αποδειχθεί ότι κάποια βήματα παρέχουν τη μέγιστη δυνατή προστασία από αυτή. Εάν παρουσιαστεί αιφνίδια κατάσταση απελευθέρωσης ραδιενέργειας ο καθένας μπορεί να λάβει μέτρα για να προστατεύσει τον εαυτό του και τους γύρω του. Αρχικά πρέπει να μπει μέσα σε ένα κτίριο και να βρεί καταφύγιο για ένα χρονικό διάστημα αποφεύγοντας πόρτες και παράθυρα, ούτως ώστε να μειώσει την έκθεσή του σε ακτινοβολία. Πρέπει να κλείσει και να ασφαλίσει τα κουφώματα και τις πόρτες, ενώ καθόλη τη διάρκεια της παραμονής του μέσα στο κτίριο είναι συνετό να καταναλώνει εμφιαλωμένο νερό και κλειστά τρόφιμα. Μένοντας συντονισμένος στο ραδιόφωνο, την τηλεόραση ή το ίντερνετ μαθαίνει τις τρέχουσες εξελίξεις και οι αξιωματούχοι έκτακτης ανάγκης καθώς και ειδικοί θα καθοδηγούν τους πολίτες σχετικά με το που να πάνε και πως να διαχειριστούν την κατάσταση.

## 8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο άνθρωπος αντιμετωπίζει πολλούς κινδύνους στην καθημερινή του ζωή. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετήσαμε και αναλύσαμε τη ραδιενέργεια που δέχεται, καθώς ζει και επιζεί ανέκαθεν μέσα σε ένα ραδιενεργό περιβάλλον. Η ραδιενέργεια επιδρά στον οργανισμό κατά τρόπο πολύπλοκο, άλλοτε ευεργετικά και άλλοτε βλαβερά, ανάλογα με το είδος, την ένταση και την ενέργεια που μεταφέρει. Καταστρέφεται καθημερινά το DNA μεγάλου αριθμού κυττάρων του ανθρώπου, χωρίς αυτό να προκαλεί σοβαρά προβλήματα, καθώς ο οργανισμός συνεχώς επιδιορθώνει επιτυχώς, στην συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων, τις βιολογικές βλάβες. Όταν όμως οι δόσεις της ακτινοβολίας είναι πολύ υψηλές, έχει ως αποτέλεσμα να προκαλούνται σοβαρές επιπτώσεις στον οργανισμό του ανθρώπου, ακόμα και να επιφέρει το θάνατο. Παράλληλα όμως, η χρήση της ακτινοβολίας αυτής στην ιατρική, τη βιομηχανία, την ενέργεια, στον επιστημονικό και τεχνολογικό τομέα, έχει επιφέρει μεγάλα οφέλη για την κοινωνία. Είναι πλέον ένα βασικό εργαλείο για τη θεραπεία ορισμένων μορφών καρκίνου.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι σεβόμαστε την ακτινοβολία αλλά δεν την φοβόμαστε. Αποδεχόμαστε την ύπαρξή της, αλλά αποφεύγουμε να την αυξήσουμε αναίτια γιατί τότε αυξάνουμε τον κίνδυνο για την υγεία μας. Επιπλέον, σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Υγείας, στοχεύουμε σοβαρά και μεθοδικά στην μείωση του αερίου ραδονίου στο περιβάλλον μας.

Κλείνοντας να αναφέρουμε ότι σύμφωνα με άρθρο του Περιβαλλοντικού Προγράμματος του 2016 των Ηνωμένων Εθνών (UNEP): «Σήμερα, γνωρίζουμε περισσότερα για τις πηγές και τις επιπτώσεις της έκθεσης σε ιονίζουσα ακτινοβολία από σχεδόν οποιοδήποτε άλλο επικίνδυνο παράγοντα, καθώς και η επιστημονική κοινότητα έχει συνεχή ενημέρωση και την ανάλυση των γνώσεων του»

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **Βιβλία**

- Environmental Radioactivity from Natural, Industrial and Military Sources, Merril Eisenbud, Academic Press Inc, 1987, σελίδες
- Low-Level Environmental Radioactivity, Sources and Evaluation, Richard Tykva, Josef Sabol, CRC Press, 1995
- Ραδιενέργεια σε απλά ελληνικά, Μ. Αντωνόπουλος-Ντόμης, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 2004
- Ραδιενέργεια περιβάλλοντος, Κ. Παπαστεφάνου, εκδόσεις Ζήτη, 2010, σελίδες 95-122
- Radioactivity: Introduction and History, Michael F. L'Annunziata, Elsevier Science, 2007
- Review of Radioactivity, Military Use and Health Effects of Depleted Uranium, S. Zajic, July 1999

## Διαδικτυακές πηγές

- [1] <https://geoinfo.nmt.edu/resources/uranium/power.html>
- [2]  
[https://el.wikipedia.org/wiki/Ρίψη\\_ατομικής\\_βόμβας\\_στη\\_Χιροσίμα\\_και\\_το\\_Ναγκασάκι](https://el.wikipedia.org/wiki/Ρίψη_ατομικής_βόμβας_στη_Χιροσίμα_και_το_Ναγκασάκι)
- [3]  
[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CF%85%CF%81%CE%B7%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CF%8C\\_%CE%B1%CF%84%CF%8D%CF%87%CE%B7%CE%BC%CE%B1\\_%CF%84%CE%BF%CF%85\\_%CE%A4%CF%83%CE%B5%CF%81%CE%BD%CF%8C%CE%BC%CF%80%CE%B9%CE%BB](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CF%85%CF%81%CE%B7%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CF%8C_%CE%B1%CF%84%CF%8D%CF%87%CE%B7%CE%BC%CE%B1_%CF%84%CE%BF%CF%85_%CE%A4%CF%83%CE%B5%CF%81%CE%BD%CF%8C%CE%BC%CF%80%CE%B9%CE%BB)
- [4]  
<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A1%CE%B1%CE%B4%CE%B9%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1>
- [5] [http://www.mie.uth.gr/ekp\\_yliko/Energy&Environment\\_Chapter\\_2.pdf](http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/Energy&Environment_Chapter_2.pdf),  
σημειώσεις Ν. Ανδρίτσος, κεφάλαιο 2, σελίδα 5
- [6] Radiation: effects and sources, United Nations Environment Programme, Report 2016, σελίδες 1-2
- [7]  
[http://www.mariakappou.gr/analiseis\\_ennoiwn/docs/triti\\_lykeiou/%CE%A0%CE%A5%CE%A1%CE%97%CE%9D%CE%99%CE%9A%CE%97-%CE%95%CE%9D%CE%95%CE%A1%CE%93%CE%95%CE%99%CE%91.pdf](http://www.mariakappou.gr/analiseis_ennoiwn/docs/triti_lykeiou/%CE%A0%CE%A5%CE%A1%CE%97%CE%9D%CE%99%CE%9A%CE%97-%CE%95%CE%9D%CE%95%CE%A1%CE%93%CE%95%CE%99%CE%91.pdf)
- [8] <http://www.pathfinder.gr/stories/4052223/oi-kindynoi-ths-pyrhnikhs-energeias/>

- [9] <http://blogs.sch.gr/12gympers/tag/rutherford/>
  
- [10] <https://www.epa.gov/radiation/radiation-basics>
  
- [11]  
<https://apothesis.lib.teicrete.gr/bitstream/handle/11713/2877/2008katsanikaki.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
  
- [12] <http://omega.physics.uoi.gr/radon/Greek/radon.pdf>, σελίδες 1-3
  
- [13] <http://www.geo.auth.gr/106/theory/radioactivity.htm>
  
- [14]  
[https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/PHA1670/RadioPharmacy2015\\_Chapter02.pdf](https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/PHA1670/RadioPharmacy2015_Chapter02.pdf), σελίδα 33
  
- [15] [http://skiathos.physics.auth.gr/atlas/Nuclear\\_Physics/2010/Decays.pdf](http://skiathos.physics.auth.gr/atlas/Nuclear_Physics/2010/Decays.pdf), σελίδα 19
  
- [16] <http://www.slideshare.net/NikitasVougiouklis/ss-54615238>
  
- [17] <http://www.home-biology.gr/ilektromagnitikes-aktinovolies/ionizouses-aktinovolies>
  
- [18] Η ακτινοβολία στη ζωή μας, Υπουργείο Εργασίας και Κοινωνικών Ασφαλίσεων, Τμήμα Επιθεώρησης Εργασίας, Λευκωσία 2009, σελίδες 8-19, 23-29  
[http://www.mlsi.gov.cy/mlsi/dli/dliup.nsf/54A1073D52523AE8C2257E2D003AC810/\\$file/I\\_Aktinovolias\\_sti\\_zoi\\_mas.pdf](http://www.mlsi.gov.cy/mlsi/dli/dliup.nsf/54A1073D52523AE8C2257E2D003AC810/$file/I_Aktinovolias_sti_zoi_mas.pdf)
  
- [19] <http://www.physicsmag.com/2015/07/to-radienergo-periballon.html>
  
- [20] <http://multimedia.biol.uoa.gr/chapter%20%20from%20radiobiology.pdf>



- [21] <http://www.tovima.gr/science/medicine-biology/article/?aid=389712>
  
- [22] Biological effects of inhaled radionuclides: summary of ICRP Report 31, William J. Bair, σελίδες 239-246  
[http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/12/575/12575343.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/12/575/12575343.pdf)
  
- [23] <http://www.tovima.gr/science/article/?aid=390406>
  
- [24] Επιπτώσεις του ατυχήματος του Τσερνόμπιλ στην Ελλάδα, Π. Κρητίδης, Ε. Φλώρου, Χ. Χαλούλου, Εργαστήριο Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος, ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος
  
- [25] <http://users.sch.gr/xtsamis/OkosmosMas/Aktinovolies/Aktinovolies.htm>
  
- [26] <http://www.icrp.org/>
  
- [27] [http://oldportal.demokritos.gr/parousiaseis/STAMATELATOS\\_210705.pdf](http://oldportal.demokritos.gr/parousiaseis/STAMATELATOS_210705.pdf)
  
- [28]  
[https://en.wikipedia.org/wiki/International\\_Commission\\_on\\_Radiological\\_Protection](https://en.wikipedia.org/wiki/International_Commission_on_Radiological_Protection)
  
- [29]  
<https://eeae.gr/eeae/%CE%B5%CE%BA%CE%B8%CE%AD%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82-%CF%80%CE%B5%CF%80%CF%81%CE%B1%CE%B3%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CF%89%CE%BD> (2015)
  
- [30]  
<https://eeae.gr/component/simplefilemanager/?view=download&id=33>
  
- [31] [http://live-sustainably.blogspot.gr/2011/05/blog-post\\_30.html](http://live-sustainably.blogspot.gr/2011/05/blog-post_30.html)

• • • • •



• • • • •