



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

ΙΑΤΡΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Π. Παπαγιάννης
Αν. Καθηγητής,
Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής,
Ιατρική Σχολή Αθηνών
Κτίριο 5, Γραφείο 21



210 746 2442



ppapagi@med.uoa.gr



[https://eclass.uoa.gr/](https://eclass.uoa.gr/MED1114)
MED1114

Δόση ιοντίζουσας ακτινοβολίας - Δοσιμετρία

Δόση ιοντίζουσας ακτινοβολίας

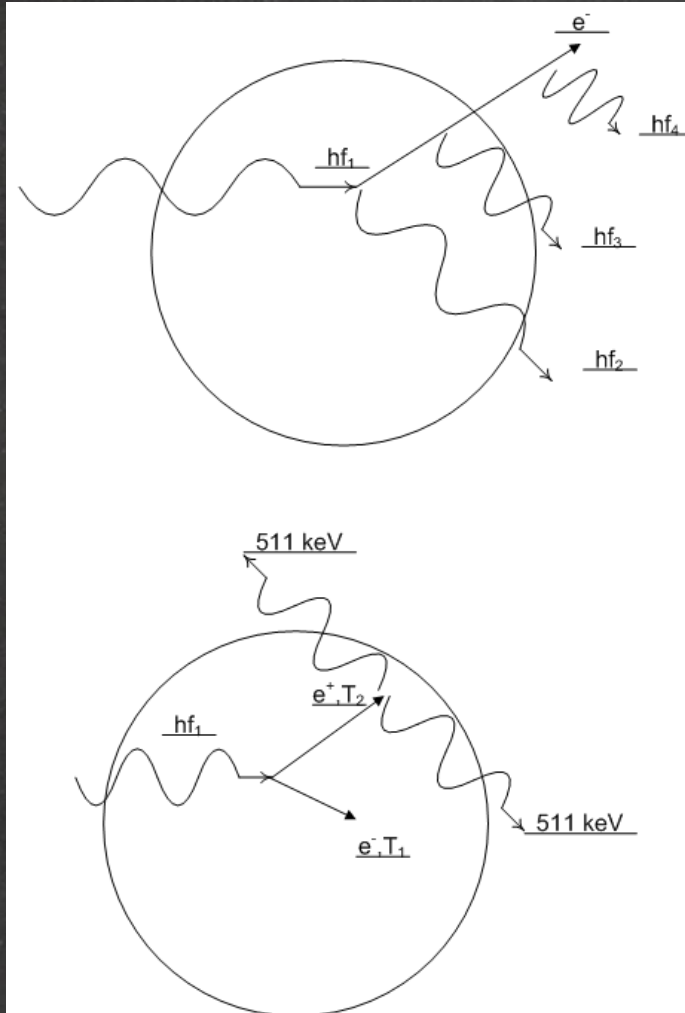
- Τα ηλεκτρόνια που προκύπτουν από αλληλεπιδράσεις φωτονίων με ένα υλικό, μεταφέρουν όλη την ενέργειά τους στο υλικό κοντά στο σημείο της αρχικής αλληλεπίδρασης, προκαλώντας περαιτέρω διεγέρσεις και ιοντισμούς των ατόμων του υλικού.
- Το αποτέλεσμα είναι η απορρόφηση ενέργειας από το υλικό.
- Η ιοντίζουσα ακτινοβολία έχει (αποδεδειγμένα) δυσμενείς βιολογικές επιδράσεις.
- Δεδομένου κατά την αλληλεπίδραση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας με την ύλη απορροφάται ενέργεια, οι βιολογικές επιδράσεις πρέπει να εξαρτώνται από το πόση ενέργεια απορροφάται.
- Η απορροφούμενη δόση, D , σε κάποιο σημείο P του υλικού ορίζεται ως το πηλίκο της μέσης τιμής της ενέργειας που μεταδίδεται στη μάζα ενός απειροελάχιστου όγκου με επίκεντρο το σημείο P :

$$D_P = \frac{\bar{\epsilon}}{m} (\text{για } m \rightarrow 0)$$

in units of Gray (1 Gy = 1 Joule / kg)

- Δόση είναι αυστηρά καθορισμένο φυσικό μέγεθος για το οποίο τηρούνται μετρολογικά πρότυπα.

Μπορεί να υπολογιστεί/μετρηθεί η δόση...;



Δεν μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια που μεταφέρεται σε ένα υλικό, ε , από ένα μόνο σωματίδιο σε μια δέσμη ιονίζουσας ακτινοβολίας.

Μπορούμε να υπολογίσουμε ή να μετρήσουμε ωστόσο την αναμενόμενη τιμή της ε :

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm}$$

$$D = \lim_{m \rightarrow 0} \frac{\bar{\varepsilon}}{m}$$

Δοσιμετρία

Ωστόσο, η δόση δεν μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά ακόμη και για τα πιο απλά προβλήματα!

Υπολογιστική δοσιμετρία:

Ημι-εμπειρικοί ή προηγμένοι αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για κλινική δοσιμετρία (Μόντε Κάρλο, γραμμικοί λύτες εξισώσεων μεταφοράς Boltzmann, ...)

Ακόμη και τότε, απαιτείται πειραματική επαλήθευση.

Πειραματική δοσιμετρία:

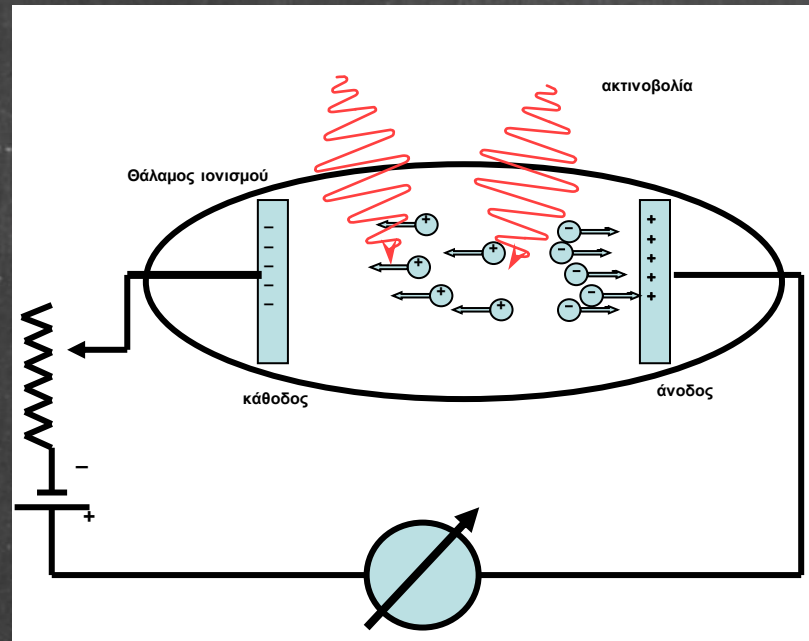
Η άμεση μέτρηση της απορροφούμενης ενέργειας (θερμιδομετρία) είναι εξαιρετικά δύσκολη και ανέφικτη στο κλινικό περιβάλλον

Για παράδειγμα, η τιμή δόσης για οξεία έκθεση σε ολόκληρο το σώμα που θα οδηγήσει σε θάνατο του 50% των εκτιθέμενων εντός 60 ημερών είναι $LD_{50/60}=4 \text{ Gy}$.

Αυτό αντιστοιχεί σε μια βιολογικά αβλαβή απορρόφηση ενέργειας (4 J ανά kg, ή 1 cal που μπορεί να αυξήσει τη θερμοκρασία 1 kg νερού κατά $0,001^\circ\text{C}$).

Πρέπει να μετρήσουμε τη δόση έμμεσα ...

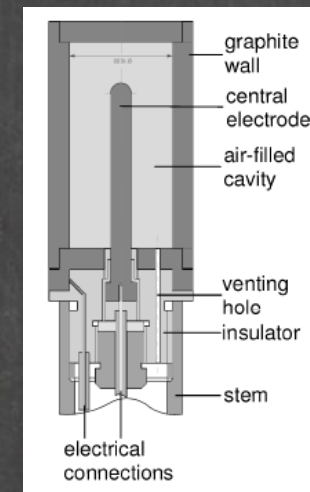
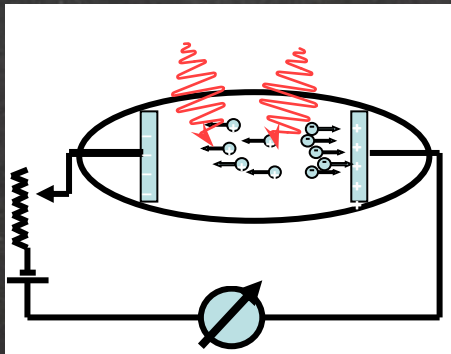
Πειραματική δοσιμετρία: θάλαμοι ιονισμού



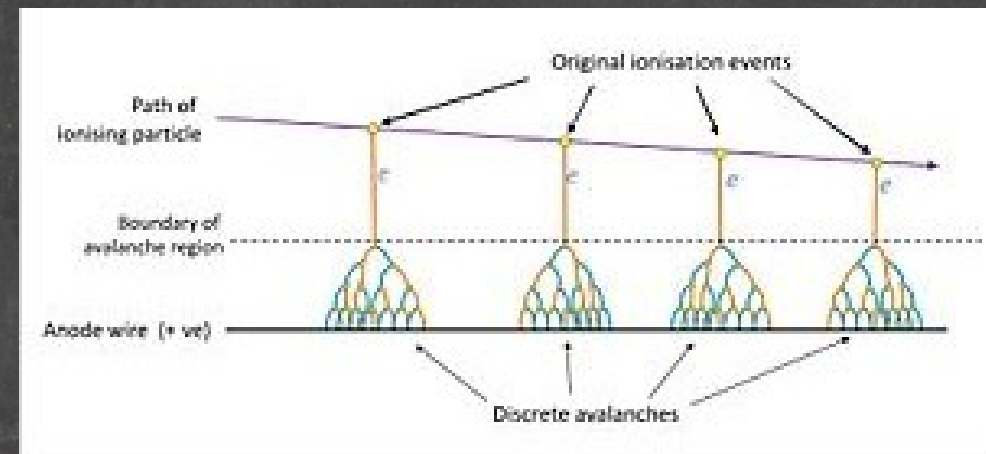
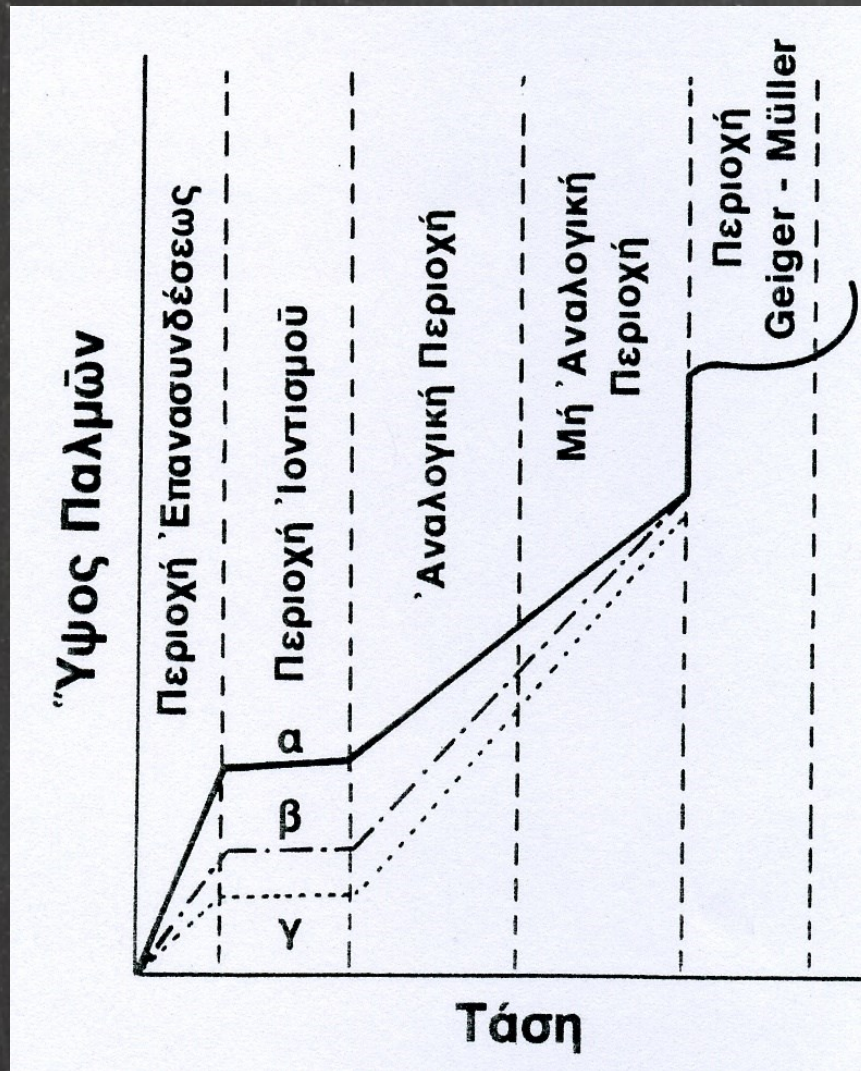
Πειραματική δοσिमетρία: θάλαμοι ιονισμού

- η μέση ενέργεια που δαπανάται από την ακτινοβολία για την παραγωγή ενός ζεύγους ιόντων είναι $(\bar{W}/e)_{air} = 33,97 \text{ eV/ζεύγος ιόντων} = 33,97 \text{ J/C}$ για ηλεκτρόνια σε ξηρό αέρα.
- Αυτή η τιμή διαφέρει για διαφορετικά φορτισμένα σωματίδια
- Αυτή η τιμή είναι περίπου σταθερή για ενέργειες ηλεκτρονίων $> 10 \text{ keV}$ και κυμαίνεται μόνο κατά 2% μεταξύ 1 keV και 10 keV.

$$D = \frac{\bar{W}}{e} * \frac{Q_{air}}{m}$$

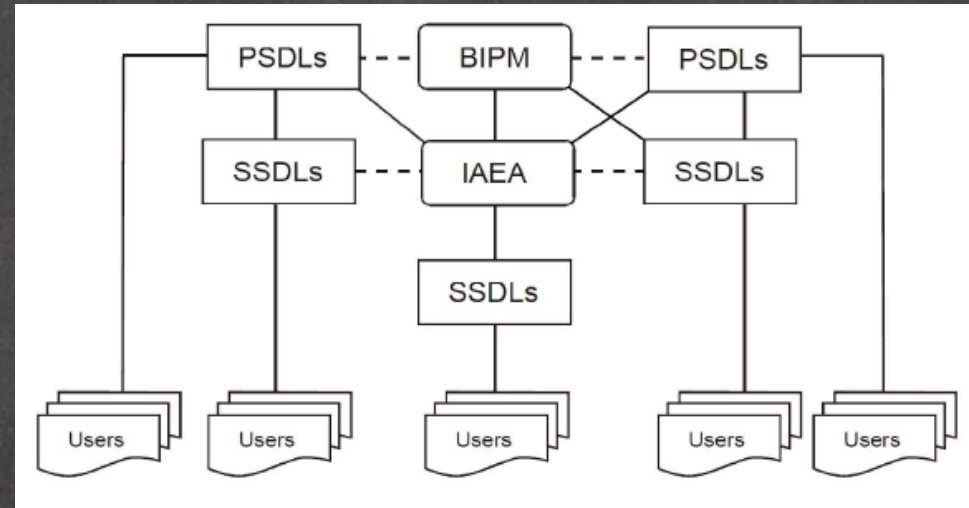
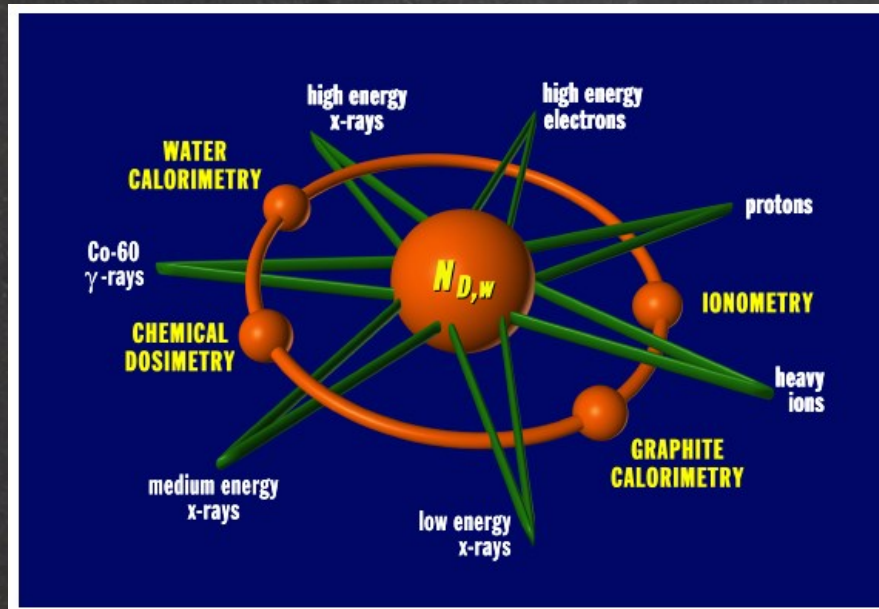


Ποια είναι η διαφορά με έναν μετρητή Geiger-Müller;



Απόλυτη έναντι σχετικής δοσιμετρίας

- Τα θερμιδόμετρα και οι θάλαμοι ιονισμού είναι απόλυτα δοσίμετρα (δεν απαιτούν βαθμονόμηση, παρόλο που οι θάλαμοι ιονισμού βαθμονομούνται για να βελτιωθεί η ακρίβεια).
- Άλλα δοσίμετρα ονομάζονται σχετικά δοσίμετρα (πρέπει να βαθμονομηθούν έναντι ενός απόλυτου δοσιμέτρου).



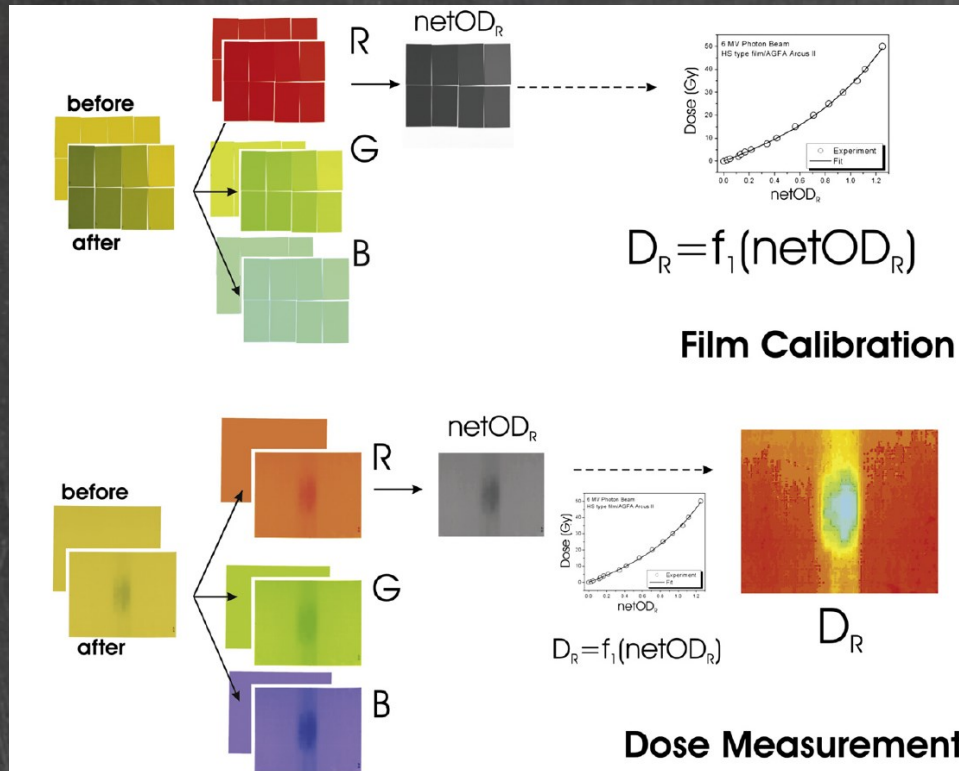
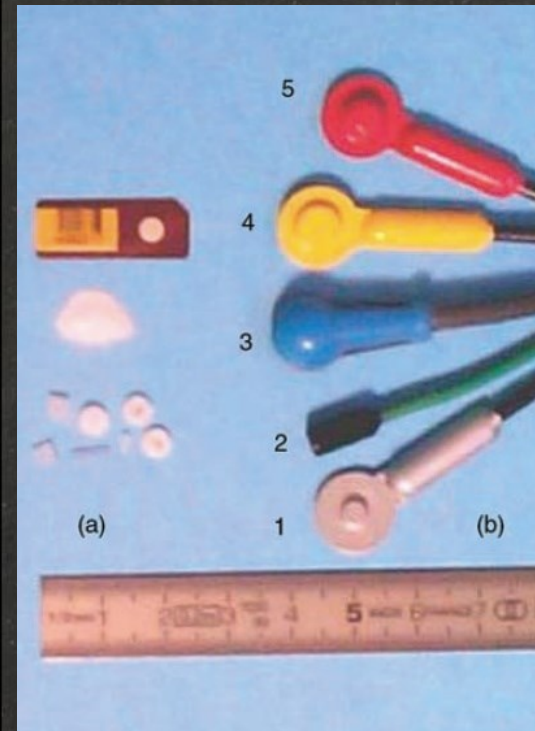
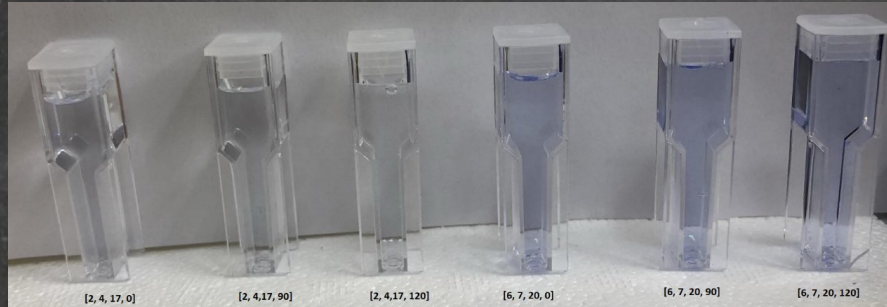
Σχετικά δοσίμετρα ...;

Κάθε σύστημα που παράγει μετρήσιμο σήμα όταν εκτίθεται σε ιονίζουσα ακτινοβολία.

Επιθυμητά χαρακτηριστικά:

- (1) Ευαισθησία: αρκετά υψηλή για μέτρηση χαμηλών ρυθμών δόσης. Αν είναι πολύ υψηλή θα προκληθεί κορεσμός σε αυξημένο ρυθμό δόσης
- (2) Επαρκές εύρος μετρούμενων δόσεων και (κατά προτίμηση) γραμμικότητα απόκρισης συναρτήσει δόσης
- (3) Ανεξαρτησία απόκρισης από παράγοντες όπως ρυθμός δόσης, T, P, διεύθυνση σε σχέση με το πεδίο ακτινοβολίας, αθροιστική δόση, κ.τ.λ.
- (4) Ανεξαρτησία απόκρισης από την ενέργεια ακτινοβολίας ή γνωστή σχέση
- (5) Σταθερότητα απόκρισης
- (6) Ακρίβεια / επαναληψιμότητα

Σχετικά δοσίμετρα ...;



Βιολογική επίδραση ιοντιζουσών ακτινοβολιών

Στάδια βιολογικής επίδρασης

Φυσικό



Χημικό



Βιολογικό

Στάδια βιολογικής επίδρασης

Επίπεδο οργάνωσης:	Στάδιο	Χρονική κλίμακα (sec)	Γεγονότα και διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα
ατομικό	Φυσικό	10^{-18} – 10^{-15} (asec – fsec)	απορρόφηση ενέργειας, διεγέρσεις και ιονισμοί
	Φυσικο-χημικό	10^{-15} – 10^{-8} (fsec – nsec)	αναδιάταξη διεγερμένων και ιονισμένων μορίων, σχηματισμός δραστικών ελευθέρων ριζών κυρίως από τη ραδιόλυση του νερού
μοριακό	Χημικό	10^{-8} – 10^{-3} (nsec – msec)	παραγωγή άτυπων μορίων, σχηματισμός βιολογικών δραστικών ελευθέρων ριζών, βλάβες βιολογικών μακρομορίων
	Βιο-χημικό	10^{-3} – 10^4 (msec – ώρες)	ενζυμικές αντιδράσεις, αναγνώριση και επιδιόρθωση βλαβών
κυτταρικό	Κυτταρικό	10^4 – 10^7 (ώρες – μήνες)	κυτταρικός θάνατος, μεταλλάξεις, μεταβολή της κινητικής της κυτταρικής διαίρεσης, βλάβες ιστών, αποκατάσταση βλαβών ιστών
συστημικό	Συστηματικό	10^8 – 3×10^9 (έτη)	ορμονικά αποτελέσματα, ανοσολογικές αντιδράσεις, βλάβες αγγείων, λειτουργικές βλάβες, καρκινογένεση

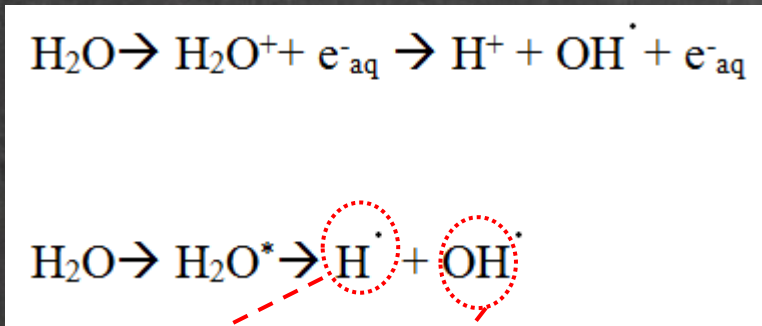
Βιολογική επίδραση σε μοριακό επίπεδο:
άμεση δράση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας

Θραύση χημικών δεσμών

**Μεταβολή φυσικών ή/και χημικών ιδιοτήτων βιολογικών
μορίων και μακρομορίων
με αποτέλεσμα άτυπα ή μη λειτουργικά μόρια**

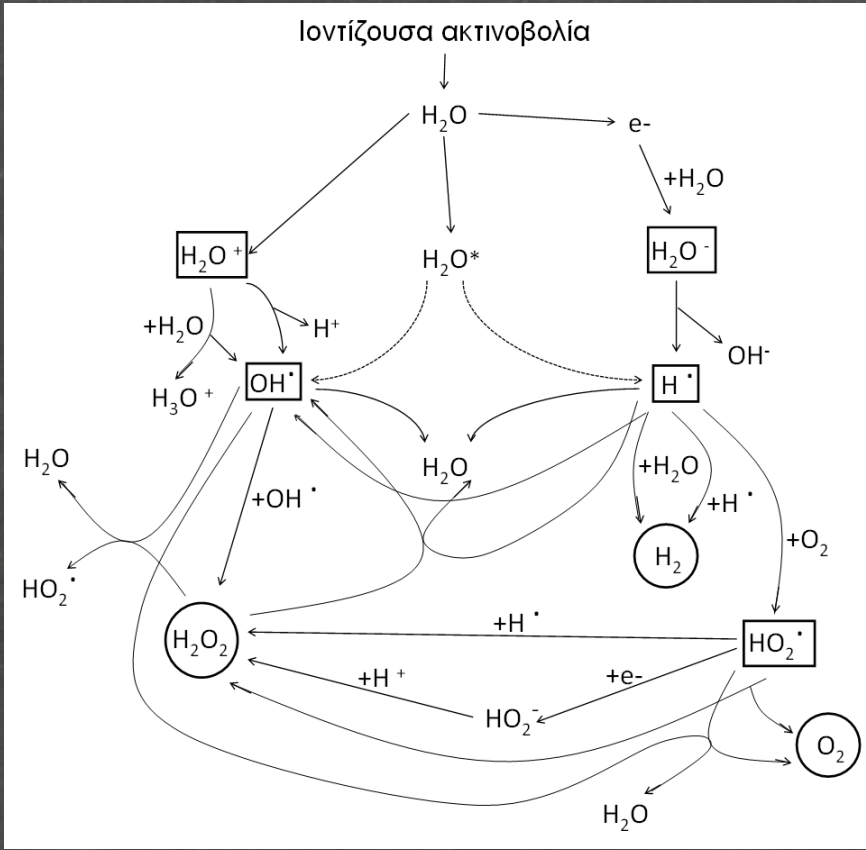
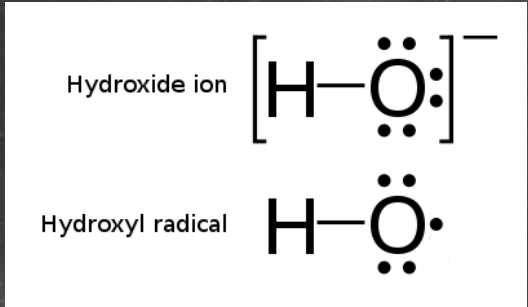
**Απορρόφηση $LD_{50/60}$ (4 Gy) επηρεάζει,
μέσω της άμεσης δράσης, 1 στα 10^7 άτομα**

Βιολογική επίδραση σε **μοριακό επίπεδο**:
έμμεση δράση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας
 ραδιόλυση του H₂O (1)

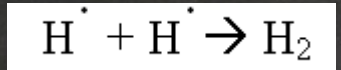


Αναγωγικός
 χαρακτήρας

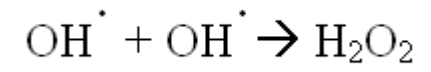
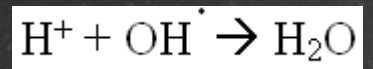
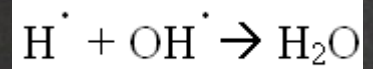
Οξειδωτικός
 χαρακτήρας



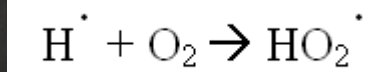
Βιολογική επίδραση σε **μοριακό επίπεδο**:
έμμεση δράση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας
ραδιόλυση του H₂O (2)



Αδρανοποίηση ελευθέρων ριζών

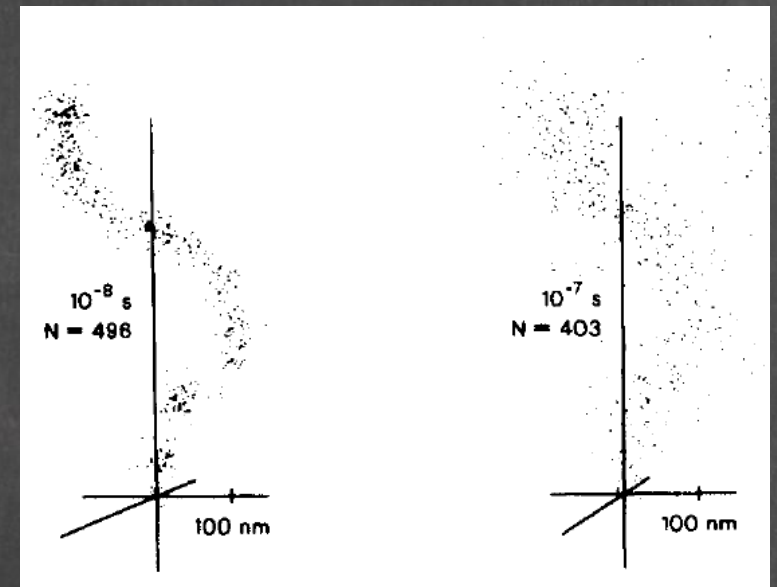
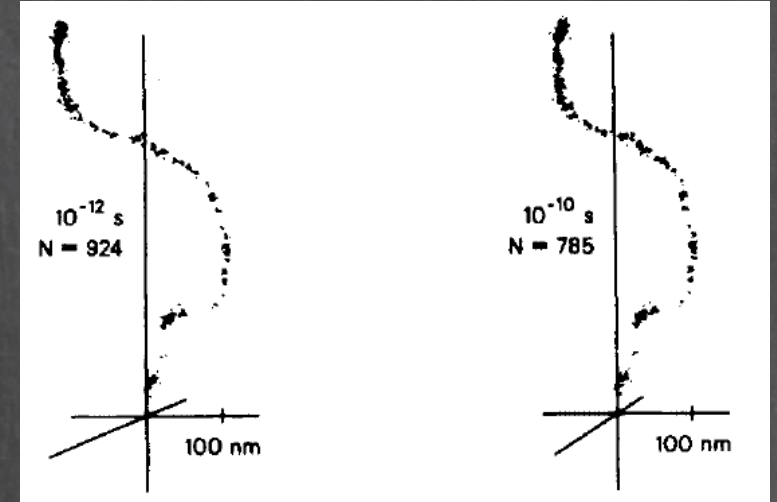


Παραγωγή υπεροξειδίου του H₂

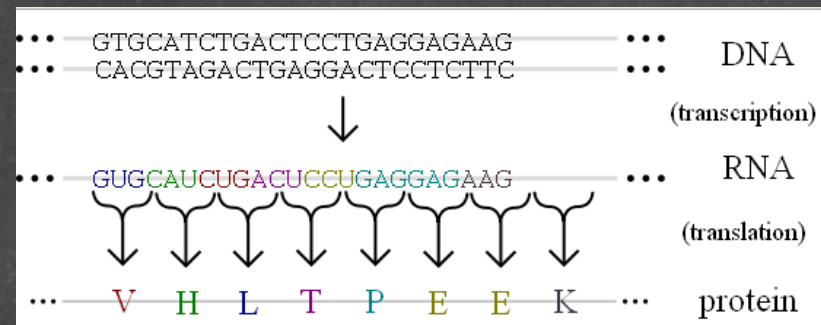
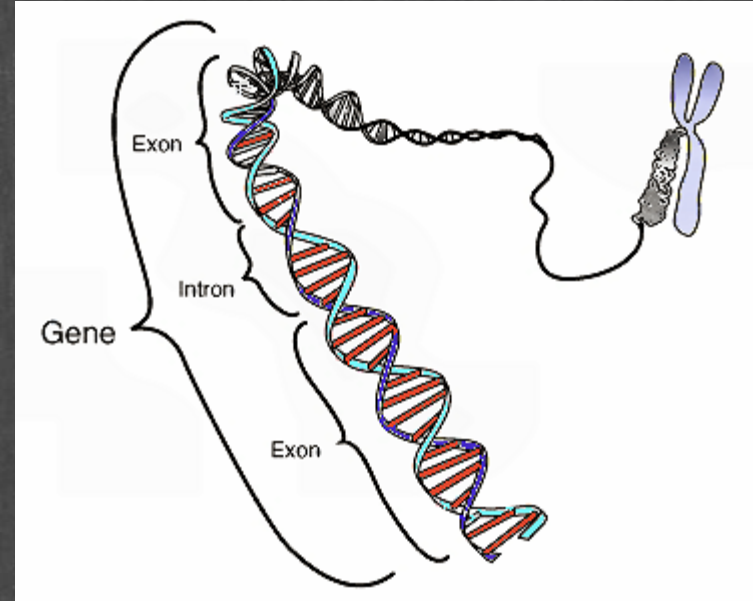
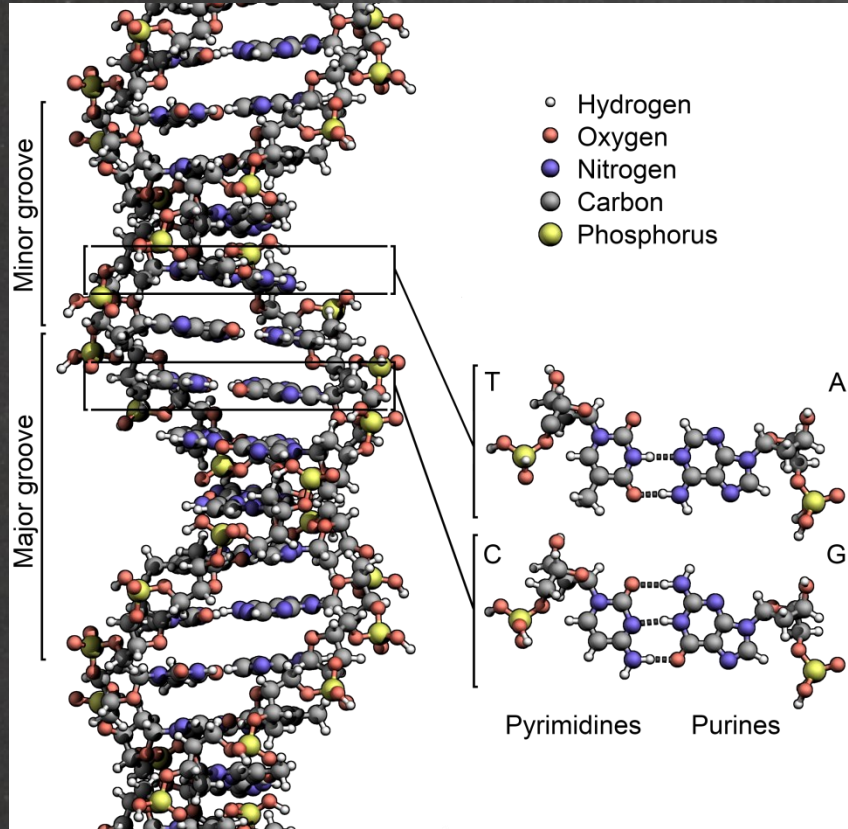


Παραγωγή ελεύθ. ρίζας υπεροξυλίου

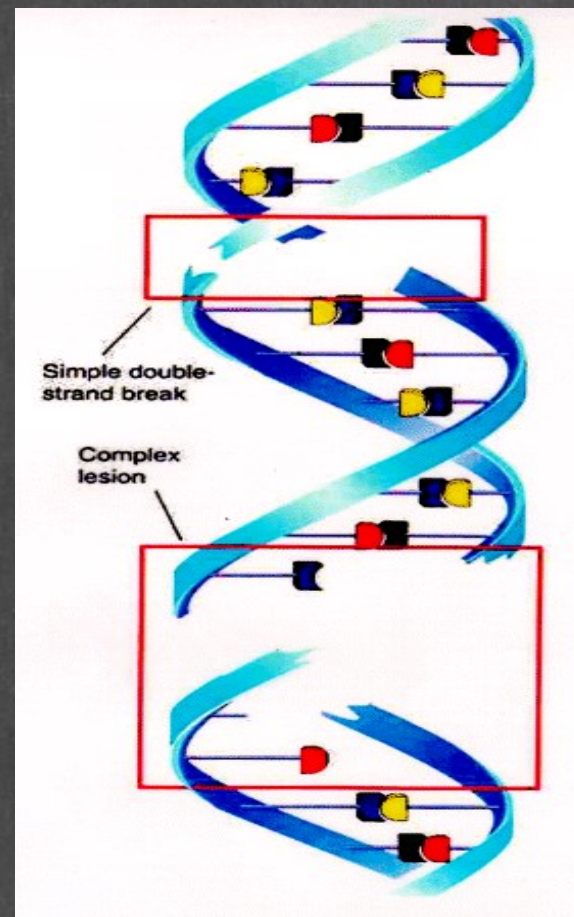
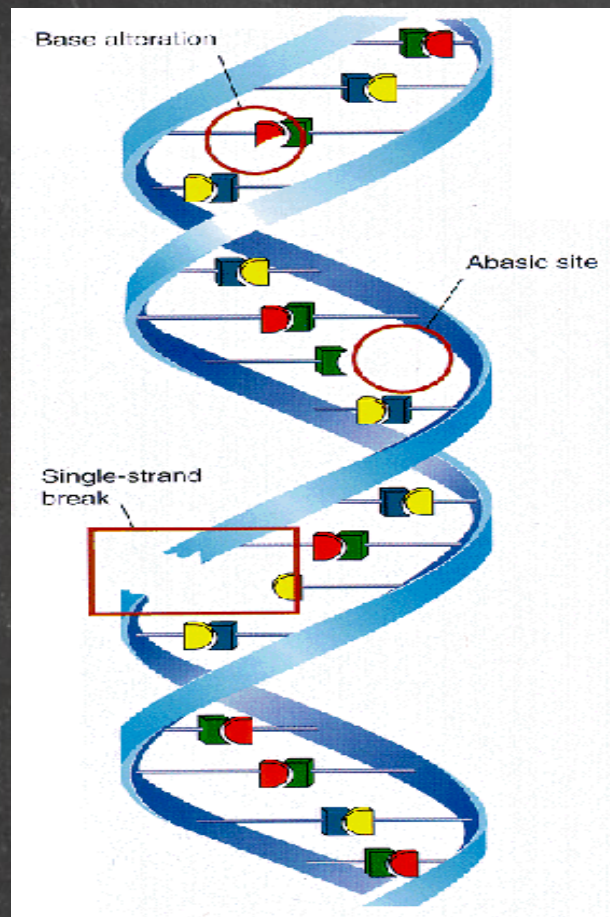
- Συνολικά, επικρατεί η παραγωγή οξειδωτικών παραγόντων στην ραδιόλυση!
- Οι οξειδωτικοί παράγοντες διαχέονται και αντιδρούν με κυτταρικά οργανικά μόρια με αποτέλεσμα τη θραύση χημικών δεσμών.



Βιολογική επίδραση σε **μοριακό επίπεδο**: η σημασία της βλάβης του DNA (1)



Βιολογική επίδραση σε **μοριακό επίπεδο**: η σημασία της βλάβης του DNA (2)



Βιολογική επίδραση σε **μοριακό επίπεδο**: η σημασία της βλάβης του DNA (3)

Δόση 1 Gy από ακτινοβολία χαμηλού LET →
10⁵ ιονισμοί / κύτταρο →
άμεση και έμμεση δράση →
40 DSB, 1.000 SSB, 1.000 βλάβες βάσεων / κύτταρο

που πρέπει να συγκριθούν με:

100.000 βλάβες του DNA καθημερινά...!!!

Το κύτταρο έχει αποτελεσματικούς μηχανισμούς επιδιόρθωσης βλάβης.

Ο πρόδρομος των διαφόρων βιολογικών επιδράσεων είναι το μικρό ποσοστό μη επιδιορθωμένης ή ανεπιτυχώς επιδιορθωμένης βλάβης του DNA, και ο τύπος βλάβης που συσχετίζεται καλύτερα με τις βιολογικές επιδράσεις της ιοντίζουσας ακτινοβολίας (ιδιαίτερα του κυτταρικού θανάτου) είναι οι DSBs και οι σύνθετες βλάβες.

Βιολογική επίδραση σε **κυτταρικό επίπεδο**: πιθανά αποτελέσματα

✓ Κυτταρικός θάνατος

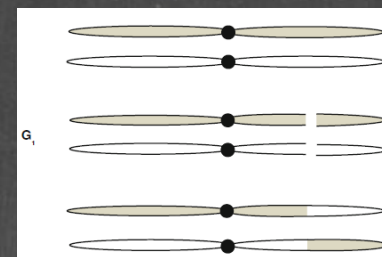
- Χαμηλή δόση: διακοπή κυττ. κύκλου, επιδιόρθωση επιτυχής? -> κανένα αποτέλεσμα
επιδιόρθωση ανεπιτυχής? -> καθυστερημένη νέκρωση/απόπτωση
- υψηλότερη δόση: μη επιδιορθώσιμη βλάβη DNA -> απόπτωση
- υψηλή δόση: εκτεταμένες βλάβες σε DNA, πρωτεΐνες, ένζυμα, μεμβράνη -> νέκρωση

✓ Γονιδιακές μεταλλάξεις

- Ανεπιτυχώς επιδιορθωμένες βλάβες του DNA οδηγούν σε μετάλλαξη (αλλαγή της αλληλουχίας βάσεων)
- Καθημερινά σημειώνονται 240.000 μεταλλάξεις / κύτταρο στις οποίες προστίθενται 2.000 ανά Gy δόσης

✓ Χρωμοσωματικές ανωμαλίες

- π.χ. λεμφοκύτταρα περιφερικού αίματος: Οδηγούν συνήθως σε μιτωτική καταστροφή.



(0 Gy)



(6 Gy)

Βιολογική επίδραση σε **κυτταρικό επίπεδο:**
κυτταρικός θάνατος
καμπύλες επιβίωσης

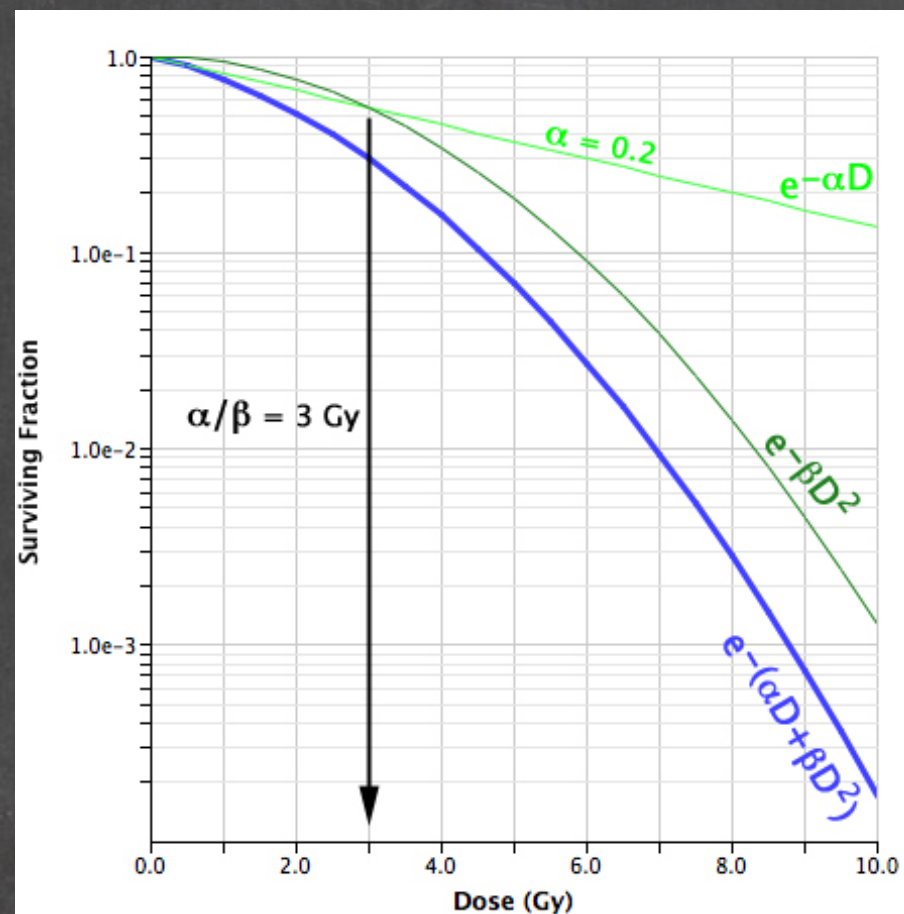
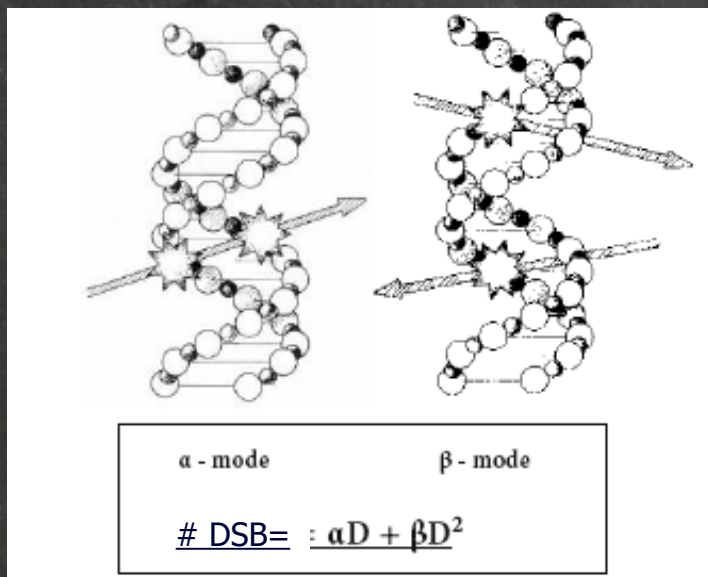
•Θεωρία στόχου

•Θεωρία πολλαπλών στόχων

•Το Linear Quadratic (LQ) μοντέλο

Βιολογική επίδραση σε **κυτταρικό επίπεδο**:
κυτταρικός θάνατος:
καμπύλες επιβίωσης
το Linear-Quadratic μοντέλο

Κλάσμα επιβίωσης=
 $N/N_0 = \exp[-(\alpha D + \beta D^2)]$



Βιολογική επίδραση σε **κυτταρικό επίπεδο**: τροποποιητικοί παράγοντες

ΦΥΣΙΚΟΙ:

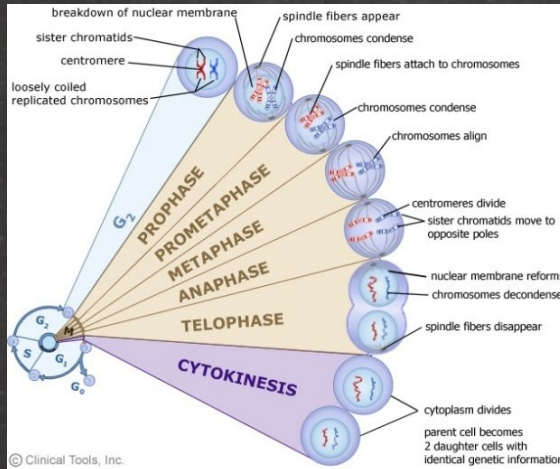
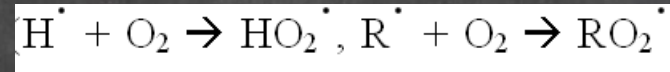
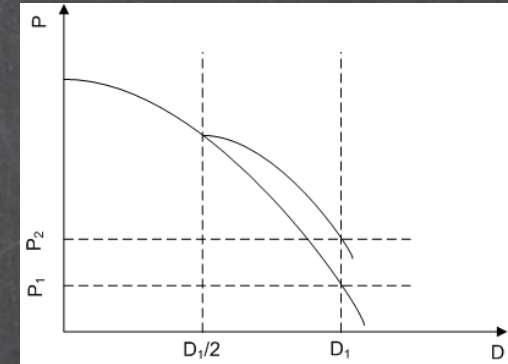
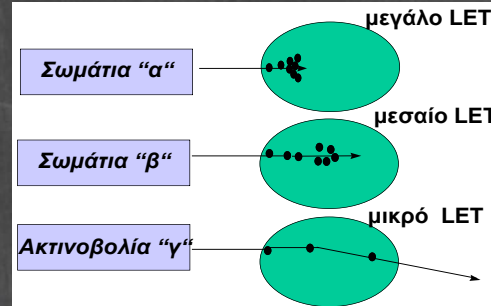
- LET
- ρυθμός δόσης / κλασματοποίηση δόσης

ΧΗΜΙΚΟΙ:

- Συγκέντρωση O₂, θειόλες κ.α.

ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΙ:

- Φάση κυτ/κού κύκλου
- Είδος κυττάρου



Ομάδα 1	Ωριμα λεμφοκύτταρα, ερυθροβλάστες, σπερματογόνια κύτταρα
Ομάδα 2	Μυελοκύτταρα, κοκκιώδη κύτταρα, εντερικά κύτταρα, βλαστικά κύτταρα της επιδερμίδας
Ομάδα 3	Γαστρικοί αδένες, ενδοθηλιακά κύτταρα, λεπτών αγγείων του αίματος
Ομάδα 4	Οστεοβλάστες, χονδροβλάστες, σπερματοκύτταρα και σπερματίδες
Ομάδα 5	Πολυμορφοπύρρηνα λευκά αιμοσφαίρια, οστεοκύτταρα
Ομάδα 6	Παρεγχυματικά κύτταρα, ινοβλάστες
Ομάδα 7	Κύτταρα του συνδετικού ιστού, ινοκύτταρα, χονδροκύτταρα, φαγοκύτταρα
Ομάδα 8	Μυϊκά και νευρικά κύτταρα

Βιολογική επίδραση σε **συστημικό επίπεδο**: Δοσιμετρικά μεγέθη και μονάδες χρησιμοποιούμενα στην ακτινοπροστασία

Ισοδύναμη Δόση:

$$H = D * W_R$$

Είδος ακτινοβολίας	W_R
Φωτόνια (χ και γ) όλων των ενεργειών	1
Ηλεκτρόνια	1
Πρωτόνια	2
Σωματία α, θραύσματα σχάσης, βαρέα ιόντα	20
Νετρόνια	5-20

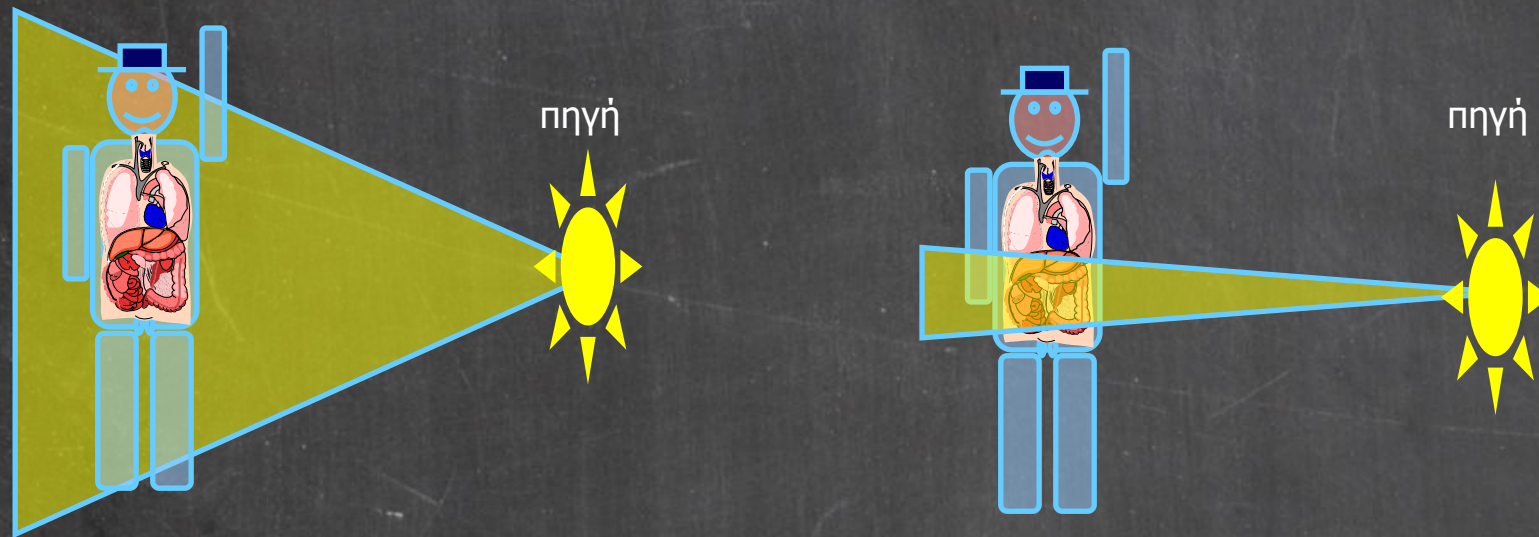
Ενεργός Δόση:

$$E = \sum_t H * w_t = \sum_t D * W_R * w_t$$

Ιστοί	W_T	ΣW_T
Μυελός των οστών, Κόλον, Πνεύμονες, Στομάχι, Μαστός, Εναπομένοντες ιστοί*	0.12	0.72
Γονάδες	0.08	0.08
Ουροδόχος κύστη, οισοφάγος, ήπαρ, θυρεοειδής	0.04	0.16
Επιφάνεια οστών, εγκέφαλος, σιελογόνοι αδένες, δέρμα	0.01	0.04

Μονάδες: Sv (Sievert)

*Εναπομένοντες ιστοί: επινεφρίδια, εξωθωρακική περιοχή, χοληδόχος, καρδιά, νεφροί, λεμφικοί αδένες, μύες, επιθήλιο στόματος, πάγκρεας, προστάτης (♂), λεπτό έντερο, σπλήνας, θύμος αδένος, μήτρα / τράχηλος (♀).



Η Ενεργός δόση E (Sv):

- ✓ Σχετίζεται με τον ενεχόμενο συνολικό κίνδυνο για την υγεία, ανεξάρτητα από το είδος της προσβάλλουσας ακτινοβολίας, τις συνθήκες ακτινοβολήσης και την ακτινοβολούμενη περιοχή του ανθρωπίνου σώματος (έχουν ληφθεί ήδη υπόψη κατά τον υπολογισμό της).
- ✓ Αντιστοιχεί αριθμητικά στην ολοσωματική ισοδύναμη δόση που έπρεπε να δεχθεί το προσβληθέν άτομο ώστε να διατρέξει τον ίδιο κίνδυνο βλάβης της υγείας του με αυτόν που διατρέχει από την τοπική ακτινοβολήση του οργάνου.

Να θυμάστε ότι :


- **Η ισοδύναμη δόση εξαρτάται από το είδος της ακτινοβολίας**
- **Η ενεργός δόση εξαρτάται από το είδος της ακτινοβολίας και το είδος του ιστού που ακτινοβολείται**

Για να έχετε μια αίσθηση των μεγεθών :


**Η ενεργός δόση που οδηγεί σε θάνατο του ανθρώπου είναι
4 Sv**


<https://www.radiologyinfo.org/en/info/safety-xray>

<https://www.radiologyinfo.org/en/info/safety-xray>


ABDOMINAL REGION	Procedure	Approximate effective radiation dose	Comparable to natural background radiation for:
	Computed Tomography (CT)–Abdomen and Pelvis	7.7 mSv	2.6 years
	Computed Tomography (CT)–Abdomen and Pelvis, repeated with and without contrast material	15.4 mSv	5.1 years
	Computed Tomography (CT)–Colonography	6 mSv	2 years
	Intravenous Urography (IVU)	3 mSv	1 year
	Barium Enema (Lower GI X-ray)	6 mSv	2 years
	Upper GI Study with Barium	6 mSv	2 years

BONE	Procedure	Approximate effective radiation dose	Comparable to natural background radiation for:
	Lumbar Spine	1.4 mSv	6 months
	Extremity (hand, foot, etc.) X-ray	Less than 0.001 mSv	Less than 3 hours

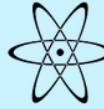
CENTRAL NERVOUS SYSTEM	Procedure	Approximate effective radiation dose	Comparable to natural background radiation for:
	Computed Tomography (CT)–Brain	1.6 mSv	7 months
	Computed Tomography (CT)–Brain, repeated with and without contrast material	3.2 mSv	13 months
	Computed Tomography (CT)–Head and Neck	1.2 mSv	5 Months
	Computed Tomography (CT)–Spine	8.8 mSv	3 years


CHEST	Procedure	Approximate effective radiation dose	Comparable to natural background radiation for:
	Computed Tomography (CT)–Chest	6.1 mSv	2 years
	Computed Tomography (CT)–Lung Cancer Screening	1.5 mSv	6 months
	Chest X-ray	0.1 mSv	10 days

DENTAL	Procedure	Approximate effective radiation dose	Comparable to natural background radiation for:
	Dental X-ray	0.005 mSv	1 day
	Panoramic X-ray	0.025 mSv	3 days
	Cone Beam CT	0.18 mSv	22 days

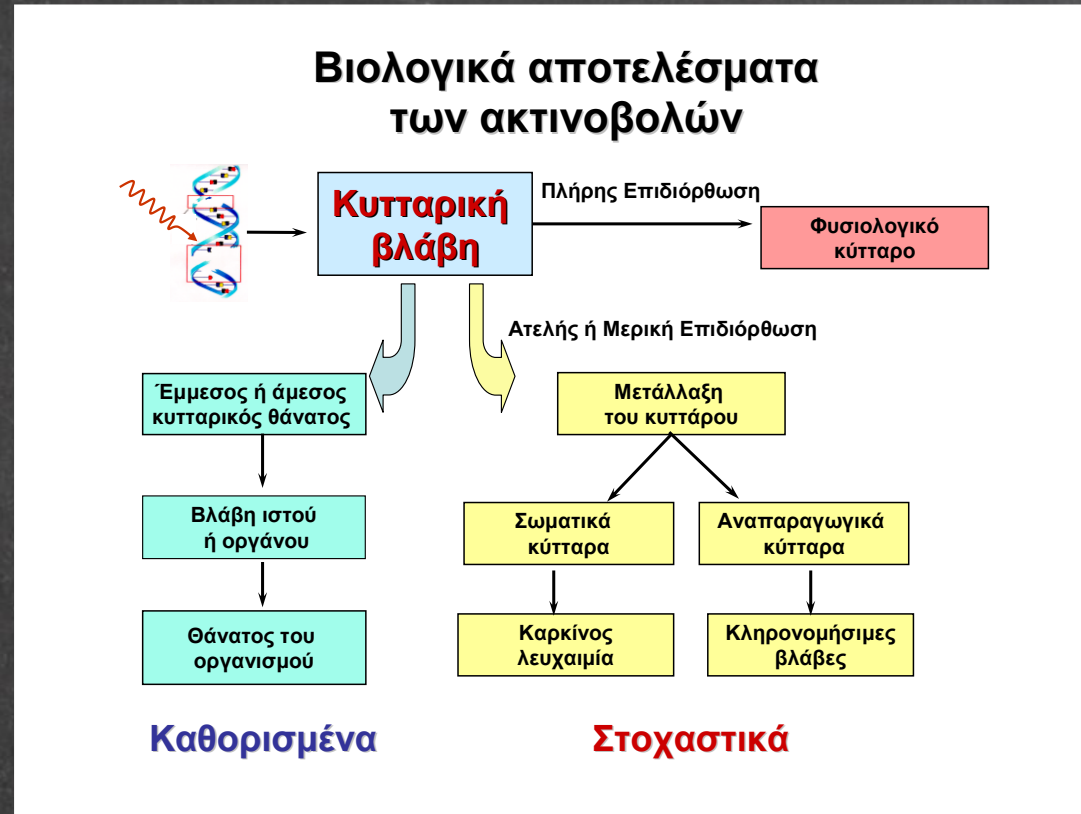
HEART	Procedure	Approximate effective radiation dose	Comparable to natural background radiation for:
	Coronary Computed Tomography Angiography (CTA)	8.7 mSv	3 years
	Cardiac CT for Calcium Scoring	1.7 mSv	6 months
	Non-Cardiac Computed Tomography Angiography (CTA)	5.1 mSv	Less than 2 years

MEN'S IMAGING	Procedure	Approximate effective radiation dose	Comparable to natural background radiation for:
	Bone Densitometry (DEXA)	0.001 mSv	3 hours

NUCLEAR MEDICINE	Procedure	Approximate effective radiation dose	Comparable to natural background radiation for:
	Positron Emission Tomography–Computed Tomography (PET/CT) Whole body protocol	22.7 mSv	7.6 years

WOMEN'S IMAGING	Procedure	Approximate effective radiation dose	Comparable to natural background radiation for:
	Bone Densitometry (DEXA)	0.001 mSv	3 hours
	Screening Digital Mammography	0.21 mSv	26 days
	Screening Digital Breast Tomosynthesis (3D Mammogram)	0.27 mSv	33 days

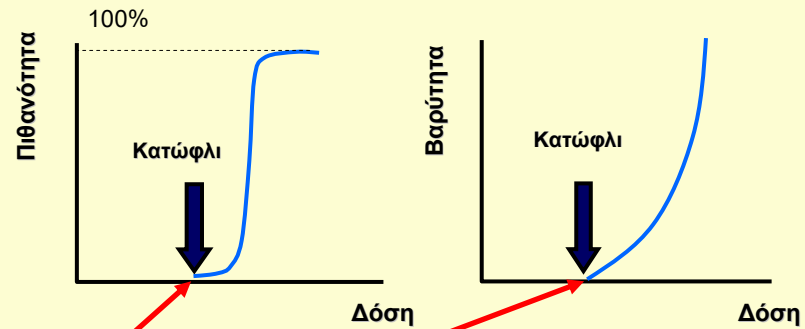
Βιολογική επίδραση σε **συστημικό επίπεδο**: είδη αποτελεσμάτων



Βιολογική επίδραση σε **συστημικό επίπεδο**: καθορισμένα αποτελέσματα (1)

Καθορισμένα αποτελέσματα

(Ερύθημα, Νέκρωση δέρματος κ.λ.π.)



$D > 0,1 \text{ Gy (100 mGy)}$

Βιολογική επίδραση σε **συστημικό επίπεδο**: καθορισμένα αποτελέσματα (2)

Effect	Organ/tissue	Time to develop effect	Acute exposure (Gy)	^b Highly fractionated (2 Gy per fraction) or equivalent protracted exposures (Gy)	Annual (chronic) dose rate for many years (Gy y ⁻¹)						
Temporary sterility	Testes	3-9 weeks	~0.1	NA	0.4	Stricture	Ureters	>6 months	NA	55-60	NA
Permanent sterility	Testes	3 weeks	~6	<6	2.0	Fracture	Adult bone	> 1 year	NA	50	NA
						Fracture	Growing bone	< 1 year	NA	25	NA
Permanent sterility	Ovaries	< 1 week	~3	6.0	>0.2		Muscle	Several years	NA	55	NA
Depression of haemopoiesis	Bone marrow	3-7 days	~0.5	~10-14Gy	>0.4	Endocrine dysfunction	Thyroid	>10 years	NA	>18	NA
Xerostomia	Salivary glands	1 week	NA	<20	NA	Endocrine dysfunction	Pituitary	>10 years	NA	≤10	NA
Dysphagia, stricture	Oesophagus	3-8 months	NA	55	NA	Paralysis	Spinal cord	> 6 months	NA	55	NA
Dyspepsia, ulceration	Stomach	2 years	NA	50	NA	Necrosis	Brain	> 1 year	NA	55-60	NA
Stricture	Small intestine	1.5 years	NA	45	NA	Cognitive defects	Brain	Several years	1-2	<20	NA
Stricture	Colon	2 years	NA	45	NA	Cognitive defects infants <18 months	Brain	Several years	0.1-0.2	NA	NA
Anorectal dysfunction	Rectum	1 year	NA	60	NA	<p>^aMost values rounded to nearest Gy; ranges indicate area dependence for skin and differing medical support for bone marrow; NA= Not Available.</p> <p>^bDerived in most cases from fractionated radiotherapeutic exposures, generally using 2 Gy per fraction. For other fraction sizes, the following formula can be used, where D is total dose (number of fractions multiplied by d), d is dose per fraction (2 Gy in the case of D₁, and new value of d in the case of D₂), and the ratio α/β can be found in the appropriate Section of this report: $D_1[1+2/(α/β)] = D_2[1+d_2/(α/β)]$</p> <p>Protracted doses at a low dose rate of around 1 cGy per minute are approximately iso-effective to doses delivered in 2 Gy fractions at high dose-rate for some tissues, but this equivalence is dependent on the repair half-time of the particular tissue. Further details can be found in Joiner and Bentzen, 2009; Bentzen and Joiner, 2009; van der Kogel, (2009).</p> <p>^c The values quoted for the lens assume the same incidence of injury irrespective of the acute or chronic nature of the exposure, with more than 20 years followup. It is emphasised that great uncertainty is attached to these values.</p>					
Hepatomegaly, ascites	Liver	2 weeks to 3 months	NA	<30-32	NA						
Main phase of skin reddening	Skin (large areas)	1-4 weeks	<3-6	30	NA						
Skin burns	Skin (large areas)	2-3 weeks	5-10	35	NA						
Temporary hair loss	Skin	2-3 weeks	~4	NA	NA						
Late atrophy	Skin (large areas)	> 1 year	10	40	NA						
Telangiectasia @ 5 years	Skin (large areas)	> 1 year	10	40	NA						
Cataract (visual impairment)	Eye	>20 years	~0.5	~0.5	~0.5 divided by years duration ^c						
Acute pneumonitis	Lung	1-3 months	6-7	18	NA						
Oedema	Larynx	4-5 months	NA	70	NA						
Renal failure	Kidney	> 1 year	7-8	18	NA						
Fibrosis/necrosis	Bladder	> 6 months	15	55	NA						

ICRP publication 118: ICRP statement on tissue reactions
and early and late effects of radiation in normal tissues and organs--
threshold doses
for tissue reactions in a radiation protection context.[Ann ICRP. 2012]

Βιολογική επίδραση σε **συστημικό επίπεδο**: καθορισμένα αποτελέσματα (3)

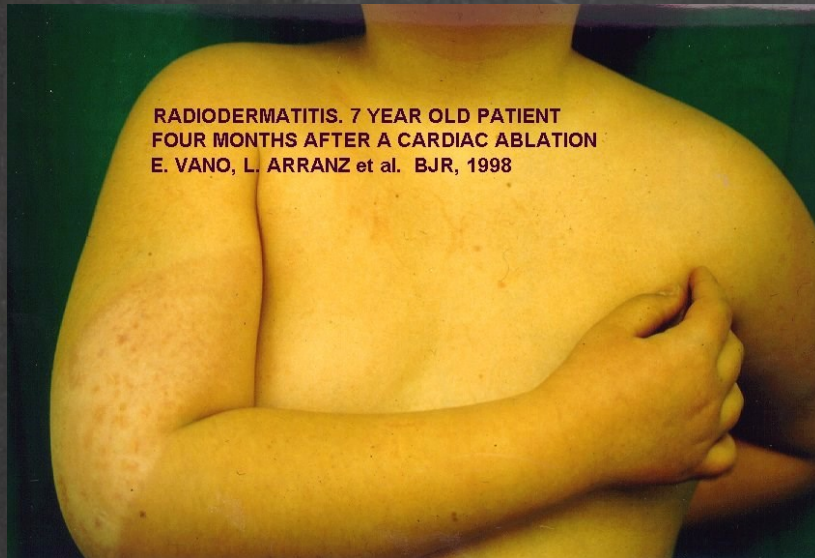
Δεν αναμένονται καθορισμένα αποτελέσματα στον εξεταζόμενο
(με εξαίρεση ατυχήματα/παρατεταμένη ακτινοσκόπηση στην επεμβατική
καρδιολογία)

Effect	Approximate threshold doses (Gy)	Time of onset
Early transient erythema	2	2-24 hours
Main erythema reaction	6	≈1.5 weeks
Temporary epilation	3	≈3 weeks
Permanent epilation	7	≈3 weeks
Dry desquamation	14	≈4-6 weeks
Moist desquamation	18	≈4 weeks
Secondary ulceration	24	>6 weeks
Late erythema	15	8-10 weeks
Ischaemic dermal necrosis	18	>10 weeks
Dermal atrophy (1st phase)	10	>52 weeks
Telangiectasia	10	>52 weeks
Dermal necrosis (late phase)	>15?	>52 weeks

ICRP publication 118: ICRP statement on tissue reactions
and early and late effects of radiation in normal tissues and organs--threshold doses
for tissue reactions in a radiation protection context. [Ann ICRP. 2012]

Η χειρουργική χρήση ακτινοσκόπησης μπορεί να οδηγήσει σε καθορισμένα αποτελέσματα

Το κρίσιμο όργανο είναι το δέρμα στο σημείο εισόδου της δέσμης



Η χειρουργική χρήση ακτινοσκόπησης μπορεί να οδηγήσει σε καθορισμένα αποτελέσματα

Το κρίσιμο όργανο είναι το δέρμα στο σημείο εισόδου της δέσμης

Skin necrosis from Coronary
Angioplasty

Skin Dose > 20 Gy

>100 minutes fluoro time



Βιολογική επίδραση σε **συστημικό επίπεδο**: καθορισμένα αποτελέσματα (4)

Δεν αναμένονται καθορισμένα αποτελέσματα στο ιατρικό προσωπικό

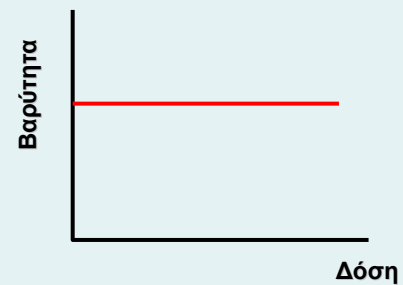
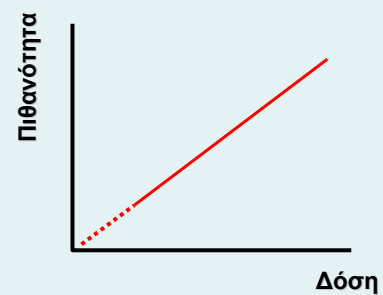
Προσοχή χρειάζεται ο φακός του οφθαλμού (εμφάνιση καταρράκτη):

- Σύμφωνα με την ICRP το κατώφλι δόσης για την εμφάνιση καταρράκτη είναι το 0,5 Gy για εφάπαξ έκθεση και 5 Gy για παρατεταμένη έκθεση
- το όριο δόσης μειώθηκε σε 20 mSv/έτος από 150 mSv/έτος για τους επαγγελματικά εκτιθέμενους

Βιολογική επίδραση σε **συστημικό επίπεδο**: στοχαστικά αποτελέσματα

Στοχαστικά αποτελέσματα

(Καρκινογένεση, Λευχαιμία, κληρονομήσιμα)



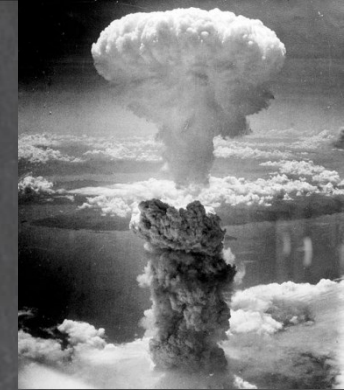
Βιολογική επίδραση σε **συστημικό επίπεδο:
στοχαστικά αποτελέσματα
επιδημιολογικά δεδομένα**

**Η μελέτη πλυθυσμών που εκτέθηκαν σε ιοντίζουσα
ακτινοβολία δείχνουν:**

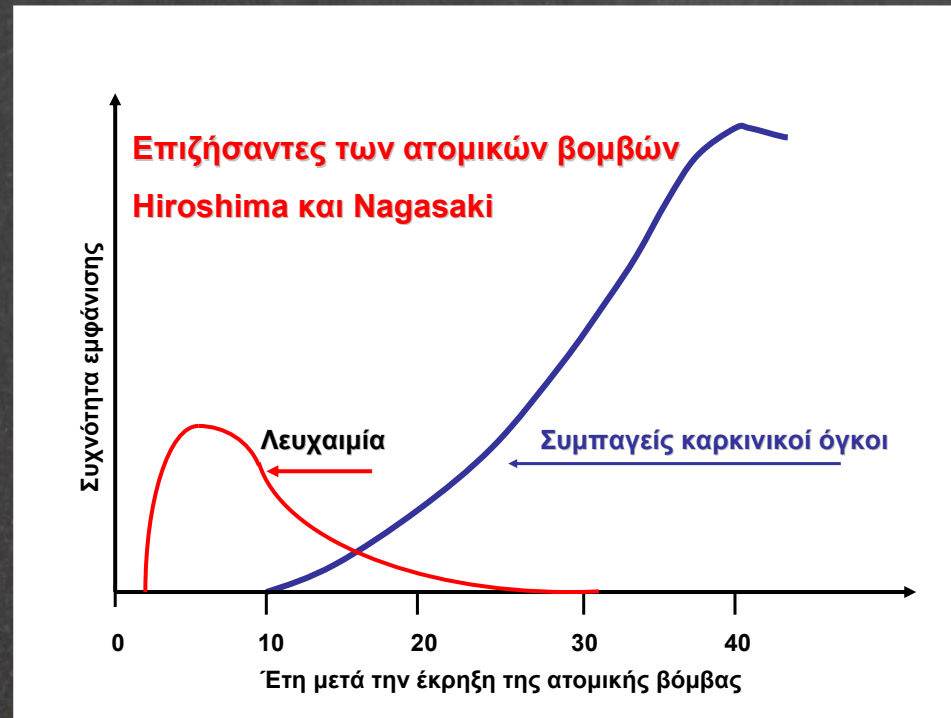
- **σαφή αύξηση της επίπτωσης του καρκίνου για δόσεις
> 200 mSv**
- **πιθανή αύξηση της επίπτωσης του καρκίνου για δόσεις
< 100 mSv**

**Η στατιστική αβεβαιότητα αυξάνει
με τη μείωση της δόσης.**

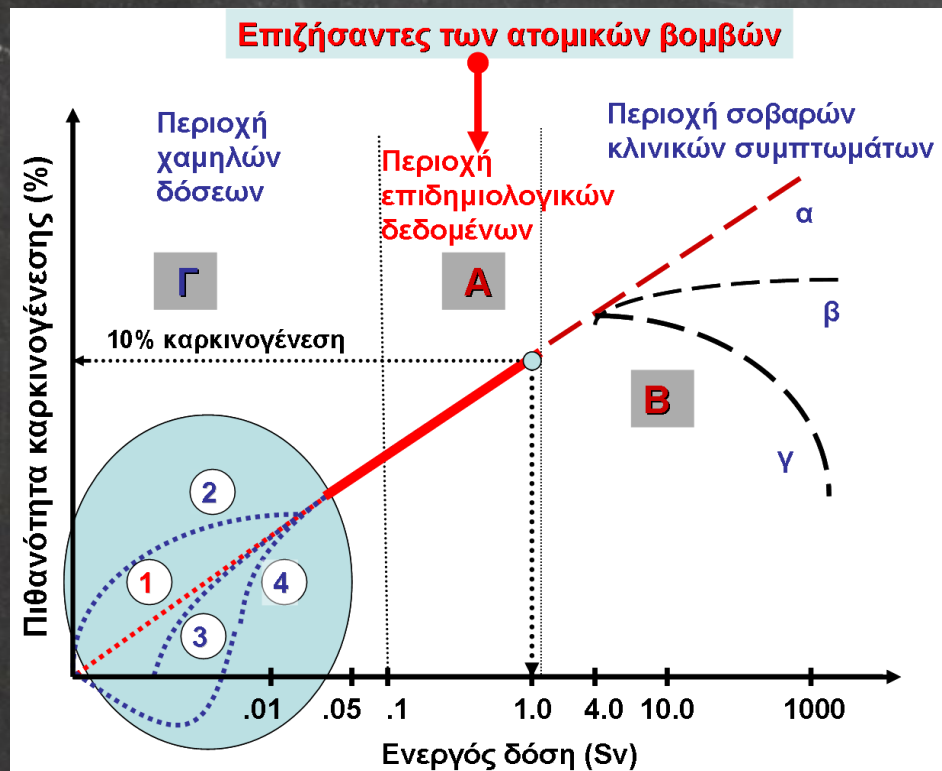
Βιολογική επίδραση σε **συστημικό επίπεδο**:
στοχαστικά αποτελέσματα
επιδημιολογικά δεδομένα
Hiroshima / Nagasaki



LSS μελέτη ($t > 60$ έτη) για $N = 10^5$ επιζήσαντες που
δέχθηκαν δόσεις από 0 έως 6 Sv
(μέση τιμή 0,24 Sv και $3 \cdot 10^4$ δέχθηκαν δόση 5-100 mSv)



Βιολογική επίδραση σε **συστημικό επίπεδο**:
 στοχαστικά αποτελέσματα
 επιδημιολογικά δεδομένα
 ποσοτικοποίηση του κινδύνου (1)



Περιοχή Α

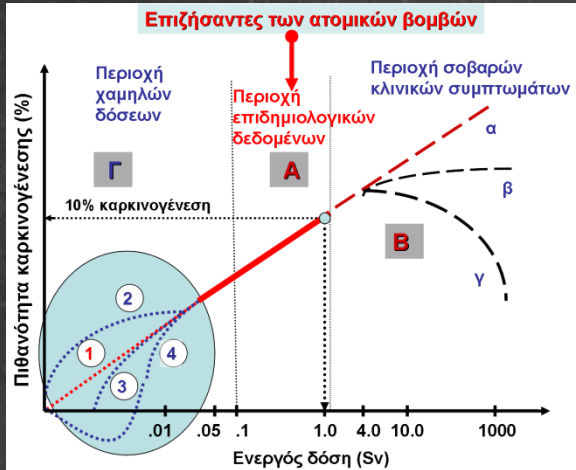
Στοχαστικό αποτέλεσμα	Μέση πιθανότητα εμφάνισης* (% ανά Sv)
Λευχαιμία	~0.9
Θανατηφόροι συμπαγείς καρκινικοί όγκοι	~11.00 **

* σταθμισμένη ως προς το φύλλο και την ηλικία
 ** ~9% για τους άνδρες & ~13% για τις γυναίκες

Φυσιολογική επίπτωση θανατηφόρου καρκίνου στο γενικό πληθυσμό: 23%

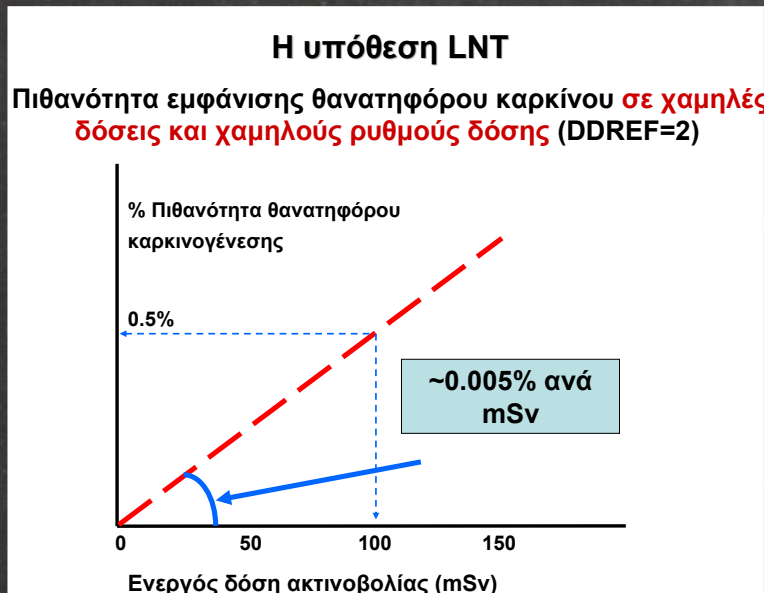
Βιολογική επίδραση σε **συστημικό επίπεδο**: στοχαστικά αποτελέσματα επιδημιολογικά δεδομένα

ποσοτικοποίηση του κινδύνου (2)



Περιοχή Γ

Η πιθανότητα καρκινογένεσης φαίνεται να είναι μειωμένη 50% σε χαμηλές δόσεις και ρυθμούς δόσης



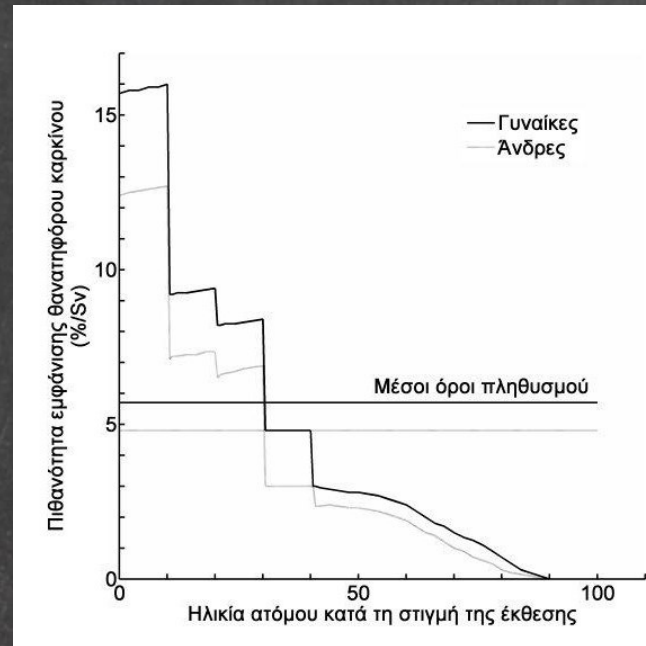
Στοχαστικό αποτέλεσμα	Μέση πιθανότητα εμφάνισης* (% ανά mSv)
Λευχαιμία	~0.0005%
Θανατηφόροι συμπαγείς καρκινικοί όγκοι	~0.0055% **
Κληρονομήσιμες βλάβες	~0.0002%

* σταθμισμένη ως προς το φύλλο και την ηλικία
** ~0.0045% για τους άνδρες & ~0.0065% για τις γυναίκες

Φυσιολογική επίπτωση θανατηφόρου καρκίνου στο γενικό πληθυσμό: 23%

Βιολογική επίδραση σε **συστημικό επίπεδο**:
στοχαστικά αποτελέσματα
επιδημιολογικά δεδομένα
ποσοτικοποίηση του κινδύνου (3)

Περιοχή Γ
Η σημασία της ηλικίας
τη στιγμή της έκθεσης σε ιοντίζουσα ακτινοβολία



Βιολογική επίδραση σε **συστημικό επίπεδο**: επιδράσεις στο έμβρυο και το κύημα

Φάση		Εβδομάδα μετά τη σύλληψη
1η	Από τη σύλληψη μέχρι την εμφύτευση του εμβρύου στο βλεννογόνο της μήτρας	0 ^η - 3 ^η
2η	Μείζον οργανογένεση	3 ^η - 8 ^η .
3η	Ανάπτυξη του εμβρύου	8 ^η - μέχρι τη γέννηση
	Διάπλαση κεντρικού νευρικού συστήματος	8 ^η - 15 ^η

Βιολογικό αποτέλεσμα		Εβδομάδα κύησης	Κατώφλι δόσης	Πιθανότητα εμφάνισης
Στοχαστικό	καρκινογένεση	>3 ^{ης}	Όχι	0,015% ανά mGy για όλη τη διάρκεια ζωής
		0 ^η - 3 ^η	Όχι	< 0,015% ανά mGy για όλη τη διάρκεια ζωής
Καθορισμένο	αποτυχία εμφύτευσης ωαρίου	0 ^η - 3 ^η	>100 mGy	
	δυσπλασία οργάνων	3 ^η - 8 ^η .	>100 mGy	
	διανοητική καθυστέρηση	8 ^η - 15 ^η	>300 mGy	40% ανά Gy
	μείωση του δείκτη IQ =25 μονάδες / Gy	8 ^η - 15 ^η	Όχι;	
>15 ^{ης}		Όχι;		

**ΔΙΕΘΝΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ
ΚΑΙ ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ**

Πηγές ακτινοβόλησης του ανθρώπου

Πηγές ακτινοβόλησης του ανθρώπου

Φυσικές Πηγές

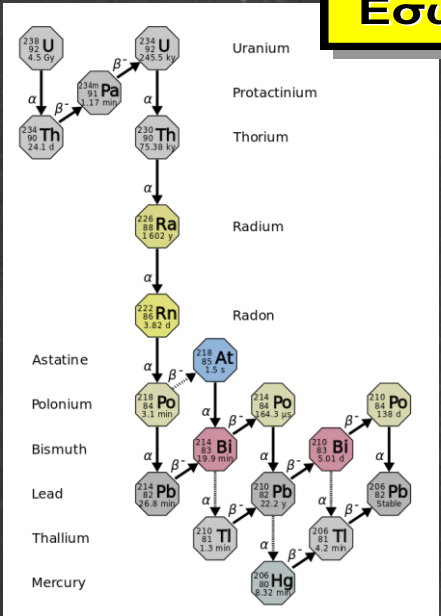
Τεχνητές πηγές

Εσωτερικές

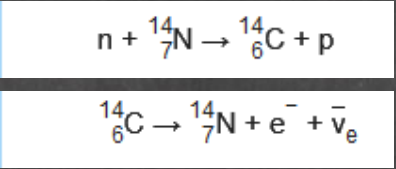
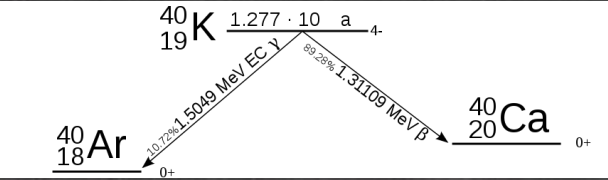
Εξωτερικές

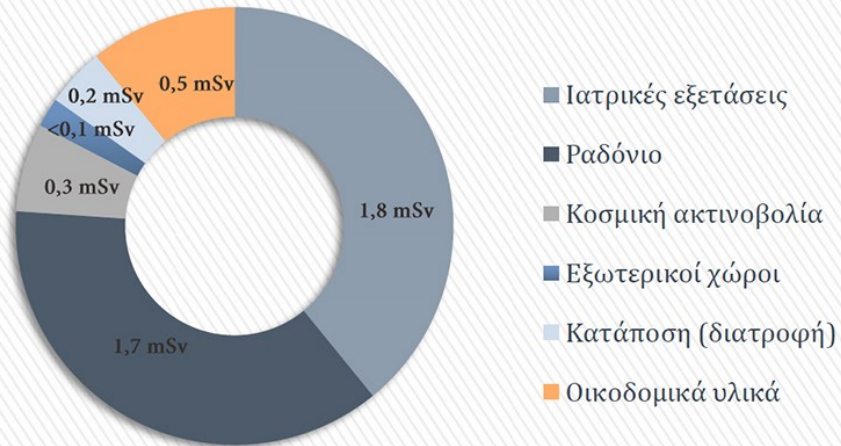
Εσωτερικές

Εξωτερικές



Φυσικά ραδιενεργά:
 - αρχέγονα (π.χ. ^{238}U , 1,6 mg \leftrightarrow 4,3kBq ^{40}K)
 - μη αρχέγονα (π.χ. ^{222}Rn , ^{14}C : $^{12}\text{C}=1.5/10^{12}$)





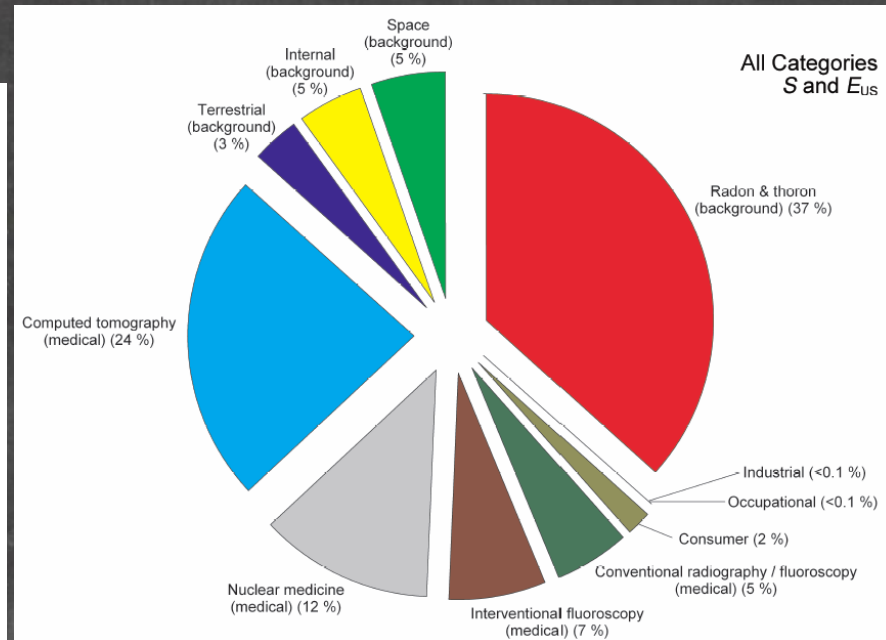
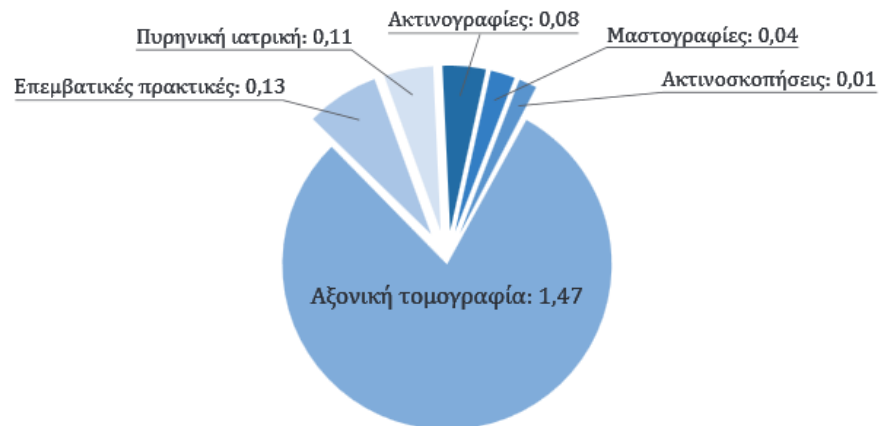
ΠΡΙΣΜΑ - Ολιστική εκτίμηση της ακτινικής επιβάρυνσης του πληθυσμού και ανάπτυξη εθνικού πληροφοριακού συστήματος για τις ακτινοβολίες (ΓΓΕΤ, Δράση ΚΡΗΠΙΣ, ΕΣΠΑ, 2007-2013)

Δεδομένα μέσης ετήσιας ενεργού δόσης (σε mSv)

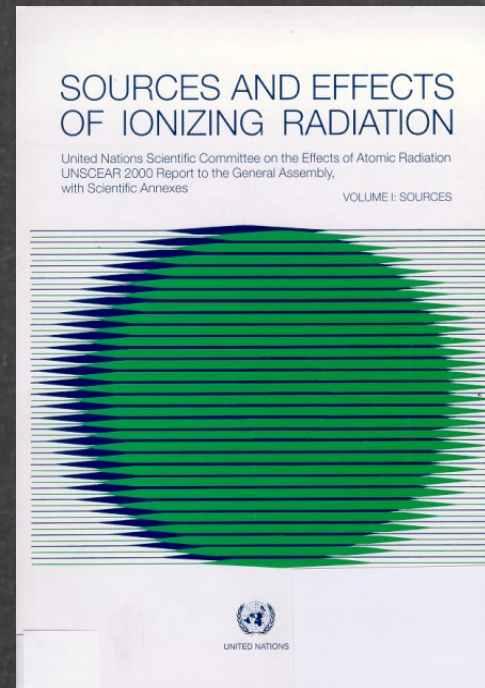
GR: 4.6 mSv (EEAE 2007-2013)

USA: 6.11 mSv (UNSCEAR 2008 REPORT Vol. I SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION)

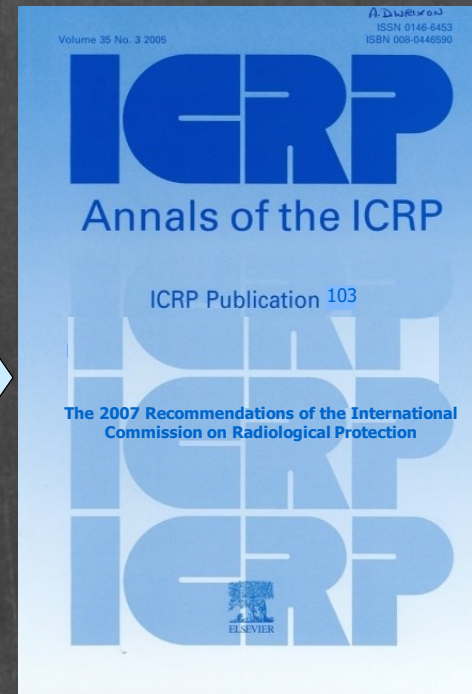
Μέση ετήσια ενεργός δόση ανά άτομο του πληθυσμού από τις ιατρικές διαγνωστικές πρακτικές (mSv)



Επιστημονική βάση της ακτινοπροστασίας
Υπάρχουσα γνώση (2007)



Αποτελέσματα
ακτινοβολίας



Συστάσεις
ακτινοπροστασίας

Ρυθμιστικό πλαίσιο Ακτινοπροστασίας,



Διεθνές Επίπεδο

International Atomic Energy Agency (ΙΑΕΑ)

2014 Basic Safety Standards

Ευρωπαϊκή Ένωση

Council Directive 2013/59/EURATOM, 5 Dec. 2013

Εθνικό Επίπεδο

ΕΛΛΗΝΙΚΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Π.Δ. 101 / ΦΕΚ 194/ Α / 20.11.2018

Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας



Έχει την ευθύνη για τη σύνταξη και την εφαρμογή των κανονισμών ακτινοπροστασίας.

Ελέγχει τις εφαρμογές των ακτινοβολιών

Δοσιμετρεί τους εργαζομένους με ακτινοβολίες.

Παρέχει εκπαίδευση, πληροφορίες, συμβουλές.

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Αιτιολόγηση

Βελτιστοποίηση

Όρια Δόσεων

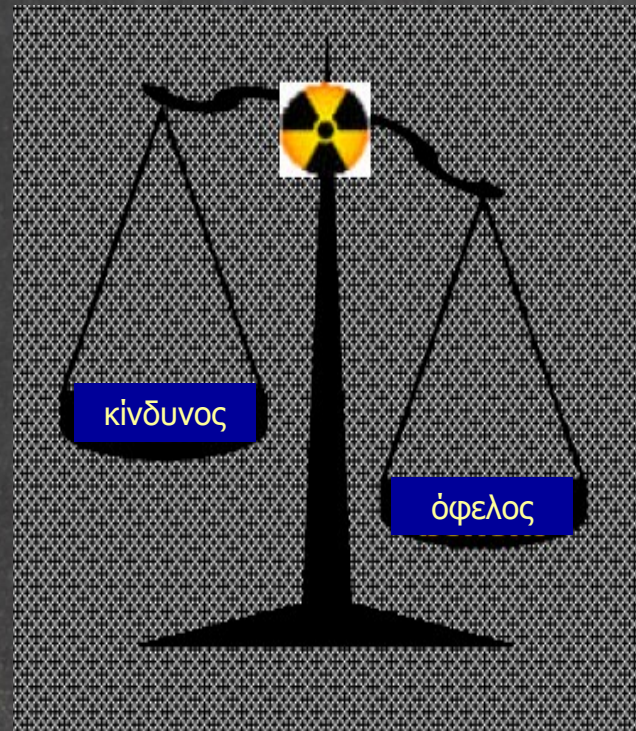
Αιτιολόγηση

Βελτιστοποίηση

Όρια Δόσεων

Αιτιολόγηση

Για να εφαρμοστεί μια πρακτική που προϋποθέτει έκθεση σε ακτινοβολία, πρέπει αυτή να προσφέρει καθαρό όφελος στον εκτιθέμενο ή στο κοινωνικό σύνολο.



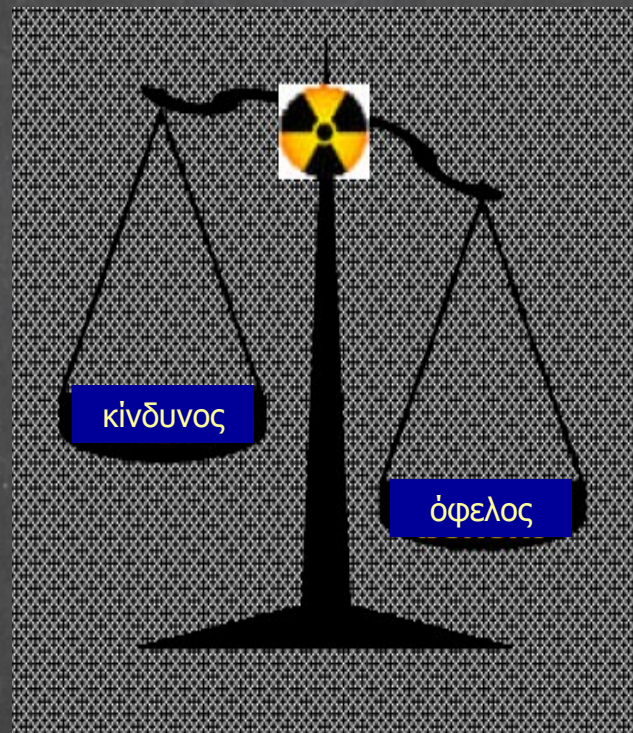
Αιτιολόγηση Ιατρικές εφαρμογές

Κρατικό Επίπεδο

Ειδική Επιτροπή του Υ.Υ.Π.

Ατομικό Επίπεδο

η έκθεση αιτιολογείται με τη συνεργασία παραπέμποντος και θεράποντος ιατρού, με βάση τα ατομικά γνωρίσματα του εκτιθεμένου.





Ευρωπαϊκή Επιτροπή

ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ 118

Οδηγίες για την παραπομπή ασθενών για ακτινολογικές εξετάσεις



ΚΛΙΝΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ	ΕΞΕΤΑΣΗ [ΔΟΣΗ]	ΣΥΣΤΑΣΗ [ΒΑΘΜΟΣ]	ΣΧΟΛΙΟ
Συμπτώματα από το μέσο ή έσω ους (συμπεριλαμβανόμενου αίτηρου) A11	CT (II)	Ειδικές εξετάσεις (B)	Η αξιολόγηση αυτών των συμπτωμάτων απαιτεί ΩΡΛ, νευρολογική ή νευροχειρουργική ειδικότητα.
Αισθητηριακή νευρογενής κώφωση (για τα παιδιά βλέπε το τμήμα II) A12	MR (0)	Ειδικές εξετάσεις (B)	Η MR είναι πολύ καλύτερη από την CT, ιδίως για ακουστικά νευρίνωματα. Για την κώφωση σε παιδιά βλέπε II4.
Νόσος των παραρρινικών κόλπων	XR κόλπου (I) CT (II)	Δεν ενδείκνυται ως συνήθης διαδικασία (B) Ειδικές εξετάσεις (B)	Η πάχυνση του βλεννογόνου είναι μη ειδικό εύρημα και μπορεί να συμβεί σε ασυμπτωματικούς ασθενείς. Η CT είναι πιο ικανοποιητική και παρέχει μοναδικές πληροφορίες για την ανατομία των στομών. Τεχνικές χαμηλής δόσης είναι επιθυμητές. Ενδείκνυται όταν αποτύχει η μέγιστη ιατρική θεραπεία, όταν εμφανίζονται επιπλοκές ή εάν υπάρχει υποψία κακοήθειας.
(για τα παιδιά βλέπε το τμήμα II) A13			
Άνοια και ανωμαλίες μνήμης, πρώτη εκδήλωση ψύχωσης	Ακτινογραφία κρανίου (I)	Δεν ενδείκνυται ως συνήθης διαδικασία (B)	Να εξετάζεται η περίπτωση της εξέτασης εάν η κλινική πορεία είναι ασυνήθιστη ή στους νεότερους ασθενείς.

A. Κεφαλή

Κριτήρια Παραπομπής Ασθενών

Οδ.ΕΕ 97/43

Κ.Α.

Άρθρο 6

Μέρος 1

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Αιτιολόγηση

Βελτιστοποίηση

Όρια Δόσεων

Βελτιστοποίηση (As Low As Reasonably Achievable)

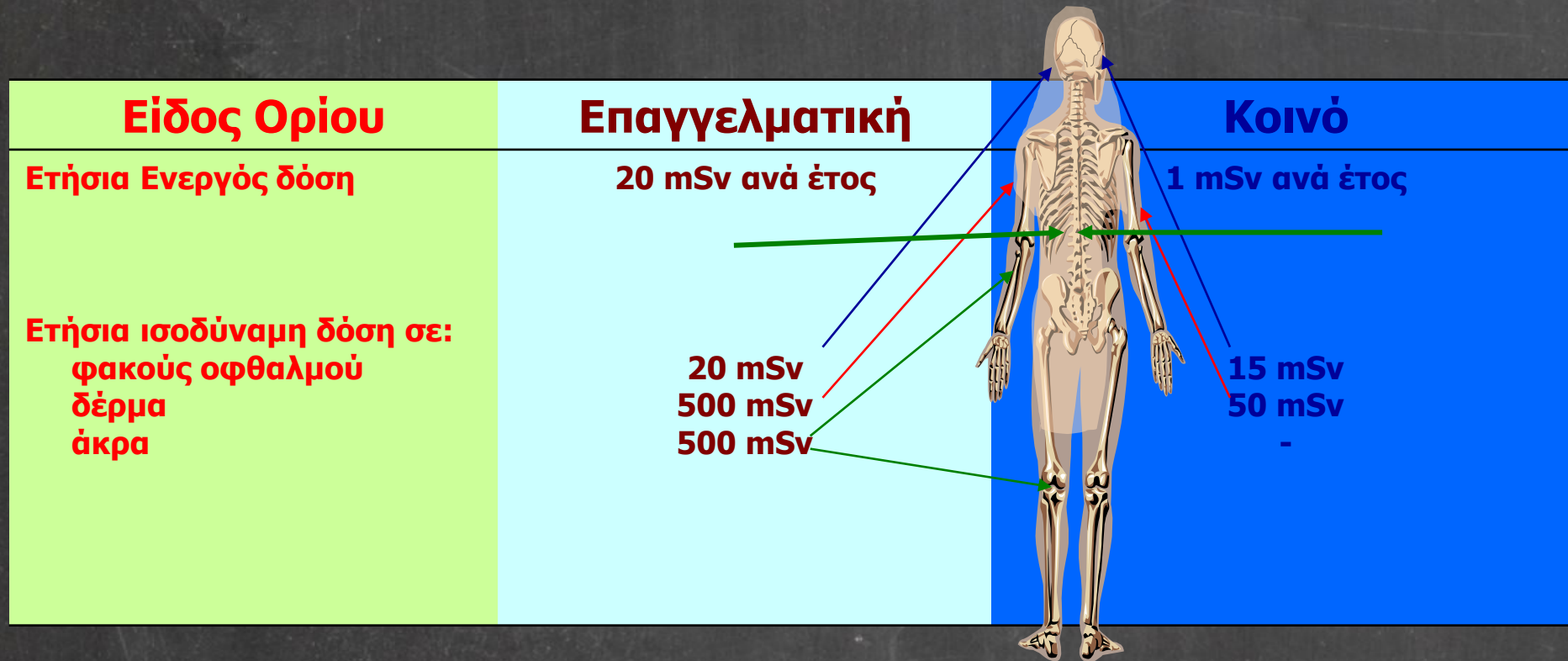
οι δόσεις στις ιατρικές εκθέσεις θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερες δίνοντας ταυτόχρονα την επιθυμητή διαγνωστική πληροφορία, λαμβάνοντας υπόψη οικονομικούς και κοινωνικούς παράγοντες

- ✓ Διάγνωση/θεραπεία
 - ✓ Πρωτόκολλα
 - ✓ Εξοπλισμός

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Ατιολόγηση
Βελτιστοποίηση
Όρια Δόσεων

Όρια δόσεων για σχεδιασμένες καταστάσεις έκθεσης



ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Αιτιολόγηση
Βελτιστοποίηση
Όρια Δόσεων

Όρια δόσεων για επαγγελματικά εκτιθέμενους
20 mSv/έτος

Αν 1000 άτομα δέχονται **20 mSv** κάθε χρόνο για 50 χρόνια

Αναμένονται λόγω της έκθεσης στα 50 χρόνια :

50 θάνατοι από καρκινογένεση.

Δηλαδή 1 θάνατος ανά έτος

(Ετήσια πιθανότητα $P = 1 / 1,000$)

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Αιτιολόγηση
Βελτιστοποίηση
Όρια Δόσεων

Επαγγελματικός κίνδυνος

έτος	θάνατοι /	
Βιομηχανία πετρελαίου-αερίου	1 / 600	1 / 1000
Λατομεία	1 / 3,000	
Ανθρακορυχεία	1 / 5,000	
Σιδηρόδρομοι	1 / 6,000	
Οικοδομή	1 / 7,000	
Γεωργία	1 / 9,000	
Χημική Βιομηχανία	1 / 12,000	
Αυτοκινητοβιομηχανία	1 / 70,000	
Βιομηχανία ρούχων	1 / 200,000	

Επαγγελματικός κίνδυνος στην Ελλάδα

	Ετήσια Δόση mSv	Αναμενόμενοι θάνατοι / έτος
Επιτρεπόμενα όρια δόσεων	20.0	1/ 1,000
Επεμβατική καρδιολογία	4.0*	1/ 5,000
Έλληνες εργαζόμενοι	0.6*	1/ 30,000
Ακτινολόγοι	0.6*	1/ 30,000

* Καταγραφείσα Μέση Ετήσια Δόση, στοιχεία ΕΕΑΕ

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Αιτιολόγηση
Βελτιστοποίηση
Όρια Δόσεων

Επαγγελματικός κίνδυνος στην Ελλάδα

έτος	θάνατοι /	
Βιομηχανία πετρελαίου-αερίου	1 / 600	← ΟΡΙΑ
Λατομεία	1 / 3,000	← (1/1000)
Ανθρακορυχεία	1 / 5,000	← ΚΑΡΔΙΟΛΟΓΟΙ
Σιδηρόδρομοι	1 / 6,000	(1 / 5,000)
Οικοδομή	1 / 7,000	ΝΟΣΗΛΕΥΤΕΣ
Γεωργία	1 / 9,000	← ΤΕΧΝΟΛΟΓΟΙ
Χημική Βιομηχανία	1 / 12,000	(1/10,000)
Αυτοκινητοβιομηχανία	1 / 70,000	← ΠΥΡ. ΙΑΤΡΟΙ
Βιομηχανία ρούχων	1 / 200,000	(1 / 14,500)

Βασικοί κανόνες ακτινοπροστασίας

