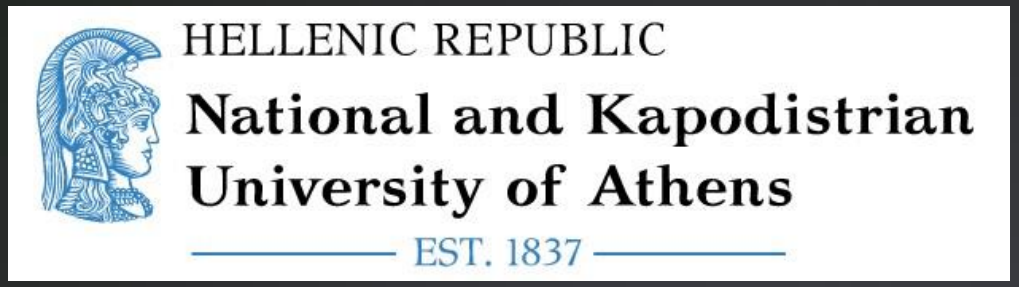


Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής

ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ
2024-2025

Ιατρική Φυσική
Στοιχεία Δοσιμετρίας Ιοντιζουσών Ακτινοβολιών

Παρουσίαση:
Ελευθέριος Παππάς
Επίκουρος Καθηγητής
Εργ. Ιατρικής Φυσικής
Ιατρική Σχολή
ΕΚΠΑ

e-mail: elepappas@med.uoa.gr

Δοσιμετρία - Δόση??

Δόση φαρμάκου:

- **Ποσότητα δραστικής ουσίας (π.χ., mg)**

Δόση ιοντίζουσας ακτινοβολίας:

- **<u>ΔΕΝ</u> είναι η ποσότητα της ακτινοβολίας**
- **Καλά ορισμένο μέγεθος (ICRU):**

5.2.5 Absorbed Dose

The *absorbed dose*, D, is the quotient of $\mathrm{d}\bar{\varepsilon}$ by $\mathrm{d}m$, where $\mathrm{d}\bar{\varepsilon}$ is the mean energy imparted by ionizing radiation to matter of mass $\mathrm{d}m$, thus

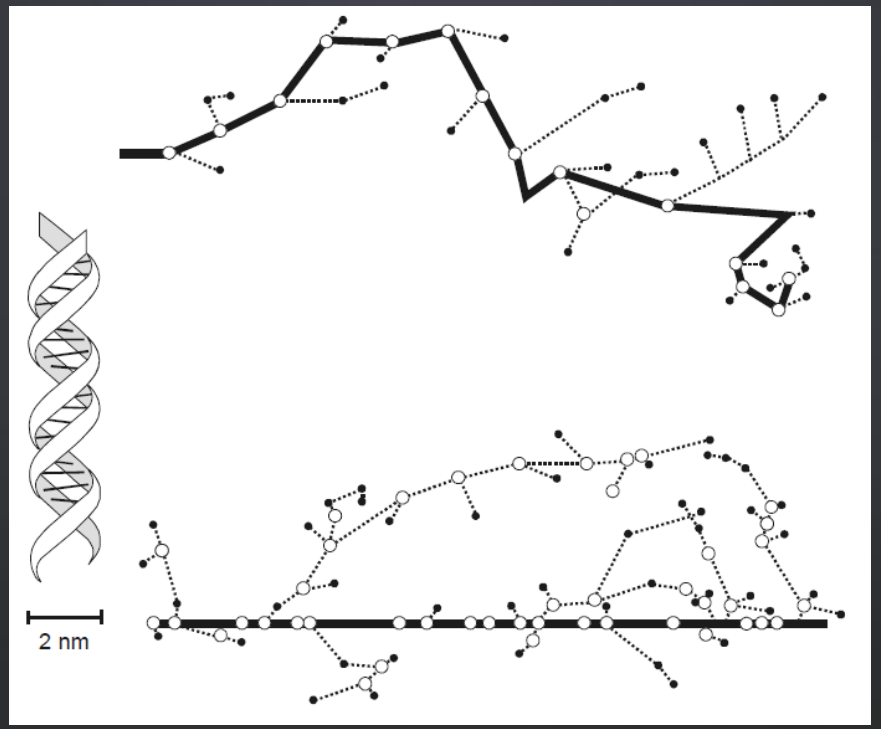
$$D = \frac{\mathrm{d}\bar{\varepsilon}}{\mathrm{d}m}.$$

Unit: $\mathrm{J\,kg^{-1}}$

The special name for the unit of absorbed dose is gray (Gy).

Δόση??

- 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 ιονισμούς των ατόμων του υλικού.
- Το αποτέλεσμα είναι η **απορρόφηση ενέργειας από το υλικό**



e^- 500 eV

Σωμάτιο α 4 MeV

Γιατί Δόση??

- Η ιοντίζουσα ακτινοβολία έχει (αποδεδειγμένα) **δυσμενείς βιολογικές επιδράσεις**. Δεδομένου κατά την αλληλεπίδραση της ιονίζουσας 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:

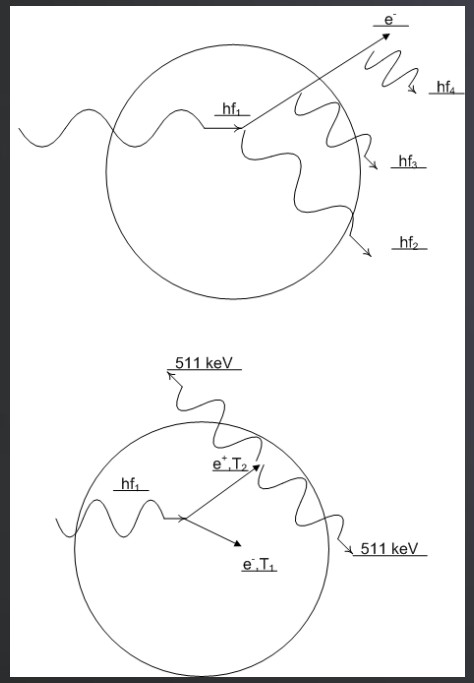
$$D_P = \frac{\bar{\varepsilon}}{m} (για\ m \to 0)$$

Μονάδα μέτρησης: **1 Gy = 1 Joule / kg**

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

Από τη Δόση στη Δοσιμετρία

- **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:



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

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

- **η αναμενόμενη τιμή είναι η μέση τιμή επαναλαμβανόμενων ανεξάρτητων μετρήσεών τους**, n, καθώς n→∞ (Ν. μεγάλων αριθμών)

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**: Χρήση μετρητικής διάταξης για την μέτρηση της ενέργειας που απορροφάται στο υλικό από μια ροή ιοντίζουσας ακτινοβολίας.
- 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 LD50/60=4 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 0,001oC).

Δόσεις στις ιατρικές εφαρμογές

Ακτινοδιάγνωση: δόση της τάξης των μGy έως δεκάδες mGy σε κάθε εξέταση

Ακτινοθεραπεία: ημερήσια δόση της τάξης των ~2 Gy επί 30 ημέρες = 60 Gy, χορηγείται τοπικά

- **Κάθε μέρα: 2 Gy = 2 J/kg**
- **Έστω ομοιόμορφη κατανομή δόσης σε μαλακό ιστό 1 kg**
- **Μέση εναποτιθέμενη ενέργεια: 2 J σε κάθε ημερήσια συνεδρία (χημική ενέργεια σε ένα αναψυκτικό: 150 kcal = 627 kJ)**
- **Τυπική διάρκεια κάθε ημερήσιας συνεδρίας: ~ 1 min**
- **Μέση ισχύς: 2J / 60 sec = 0.03 W !!! (μικρός ανεμιστήρας: ~50 W)**

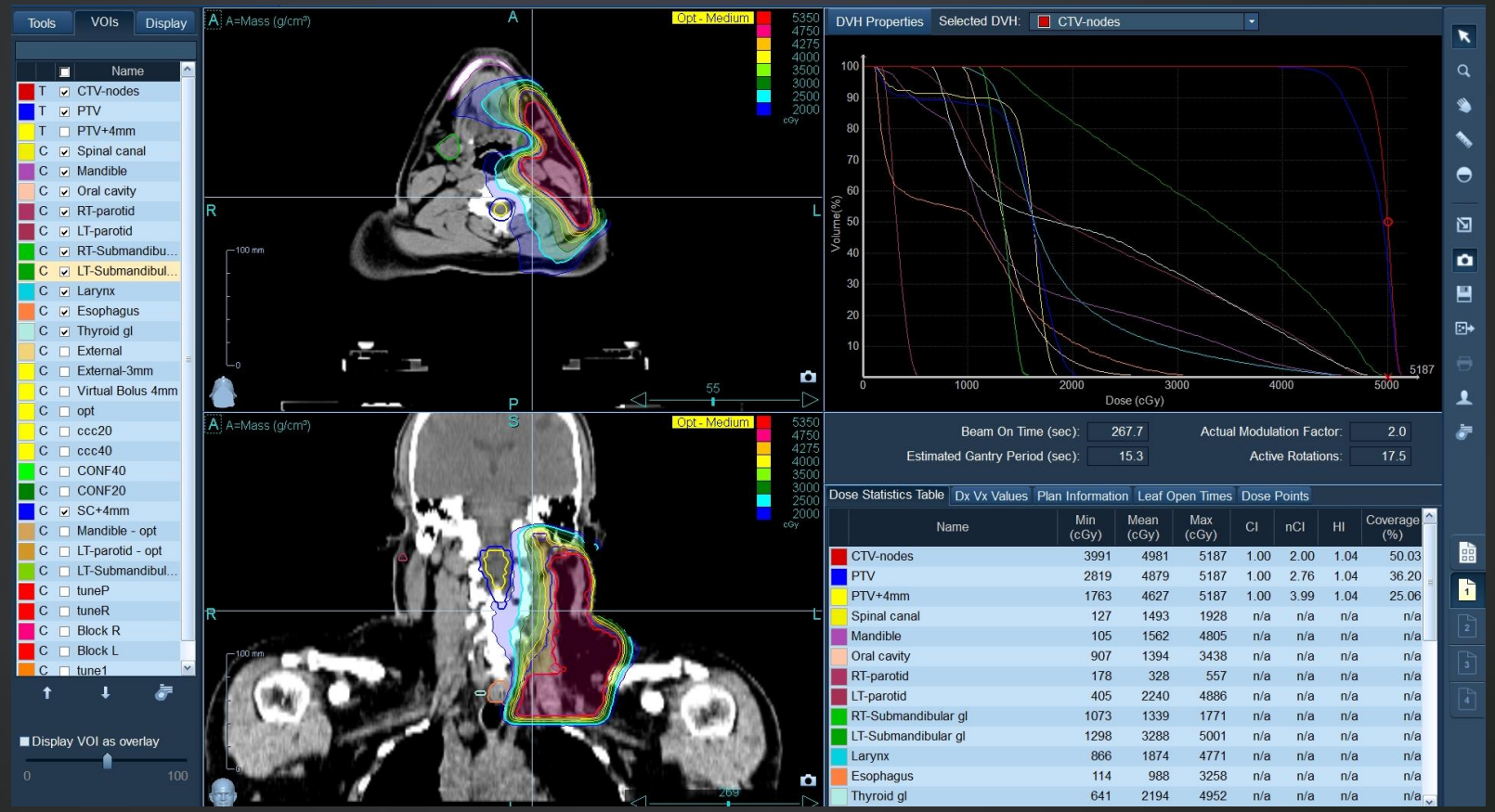
Όμως: 4 Gy ολόσωμη δόση από ιοντίζουσα ακτινοβολία αντιστοιχεί σε πιθανότητα θανάτου 50% σε 60 ημέρες

- **LD50/60 = 4 Gy. Σε όρους θερμικούς: Αύξηση κατά 0,001oC σε 1 kg νερού**

Συμπέρασμα: η ποσότητα της ενέργειας που απορροφάται είναι ελάχιστη σε σχέση με τις συνήθεις μηχανικές, χημικές ή θερμικές διεργασίες. Το βιολογικό αποτέλεσμα εξαρτάται από τον τρόπο και τον ιστό που απορροφάται η ενέργεια

Πρέπει να μετρήσω τη δόση έμμεσα …

Θυμηθείτε: η Δόση είναι σημειακή κατανομή, άρα η τιμή της μεταβάλλεται με τη θέση

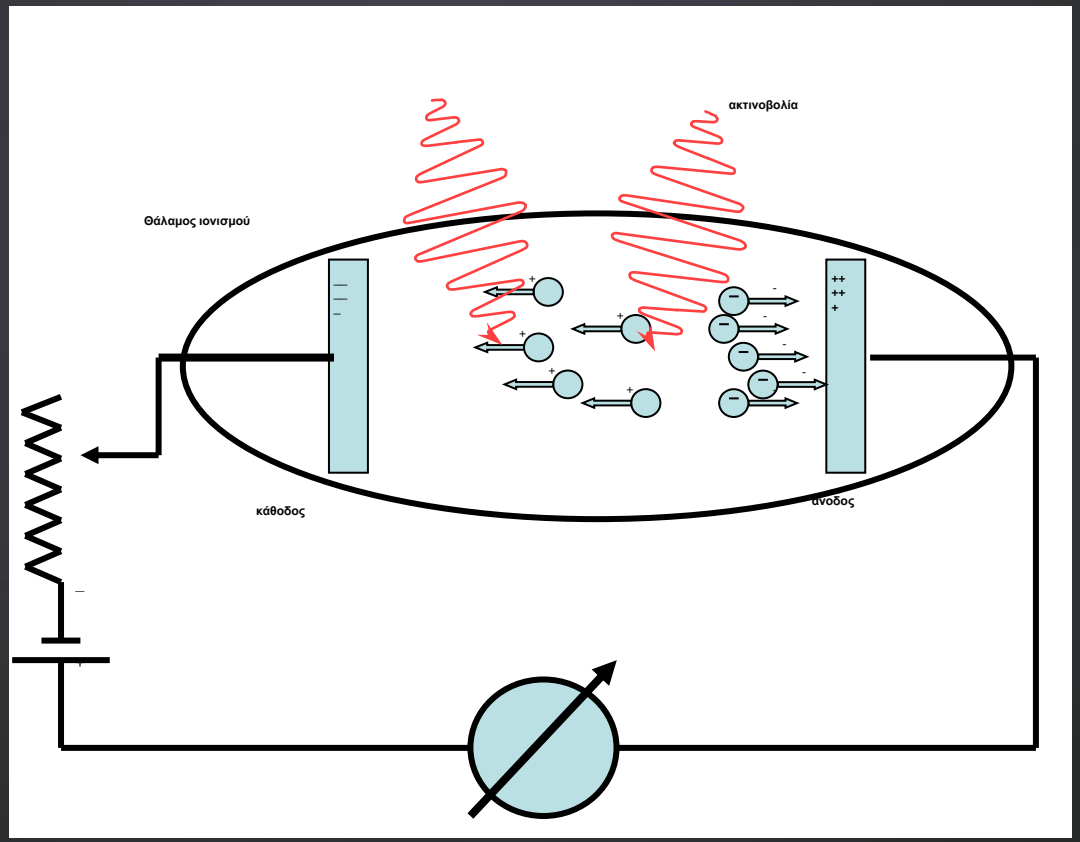


Name	Min (cGy)	Mean (cGy)	Max (cGy)	CI	nCI	HI	Coverage (%)
CTV-nodes	3991	4981	5187	1.00	2.00	1.04	50.03
PTV	2819	4879	5187	1.00	2.76	1.04	36.20
PTV+4mm	1763	4627	5187	1.00	3.99	1.04	25.06
Spinal canal	127	1493	1928	n/a	n/a	n/a	n/a
Mandible	105	1562	4805	n/a	n/a	n/a	n/a
Oral cavity	907	1394	3438	n/a	n/a	n/a	n/a
RT-parotid	178	328	557	n/a	n/a	n/a	n/a
LT-parotid	405	2240	4886	n/a	n/a	n/a	n/a
RT-Submandibular gl	1073	1339	1771	n/a	n/a	n/a	n/a
LT-Submandibular gl	1298	3288	5001	n/a	n/a	n/a	n/a
Larynx	866	1874	4771	n/a	n/a	n/a	n/a
Esophagus	114	988	3258	n/a	n/a	n/a	n/a
Thyroid gl	641	2194	4952	n/a	n/a	n/a	n/a

Πειραματική Δοσιμετρία: θάλαμος ιονισμού, το συνηθέστερο δοσίμετρο

Αντί να μετράται η αύξηση της θερμοκρασίας (θερμιδομετρία), μετράται το πλήθος των ιονισμών που προκαλεί η ιοντίζουσα ακτινοβολία

- Αρχή λειτουργίας
- Μέτρηση: συλλογή φορτίου, Cb



Πειραματική Δοσιμετρία: θάλαμοι ιονισμού

Από τη συλλογή φορτίων στη δόση ιοντίζουσας ακτινοβολίας

- η μέση ενέργεια που δαπανάται από την ακτινοβολία για την παραγωγή ενός ζεύγους ιόντων είναι:

$(\bar{W}/e)_{air}$ =33,97 eV/ζεύγος ιόντων=33,97 J/C για ηλεκτρόνια σε ξηρό αέρα.

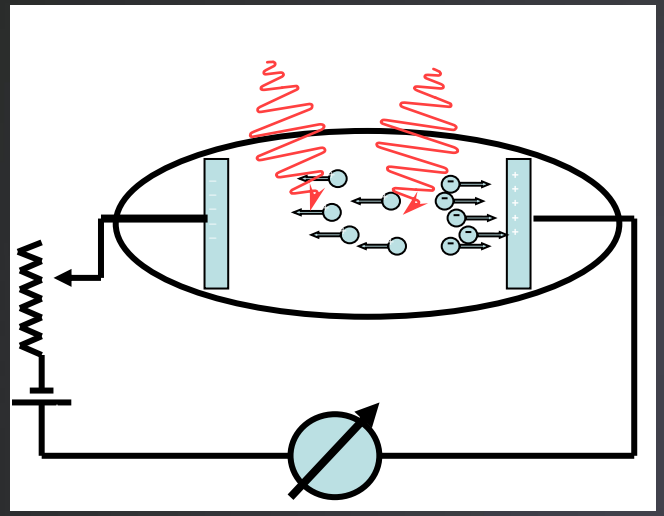
- Αυτή η τιμή διαφέρει για διαφορετικά φορτισμένα σωματίδια
- Αυτή η τιμή είναι περίπου σταθερή για ενέργειες ηλεκτρονίων >10 keV και κυμαίνεται μόνο κατά 2% μεταξύ 1 keV και 10 keV.
- Τελικά, η δόση θα είναι:

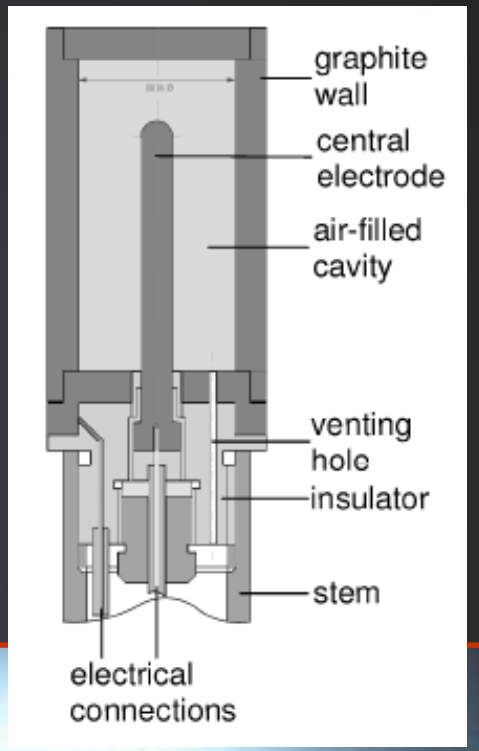
$$D = \frac{\bar{W}}{e} * \frac{Q_{air}}{m}$$

όπου Q_{air} το φορτίο που συλλέχθηκε στον θάλαμο ιονισμού που περικλείει αέρα μάζας m.

Πειραματική Δοσιμετρία: θάλαμοι ιονισμού

Συνήθεις τύποι θαλάμων ιονισμού



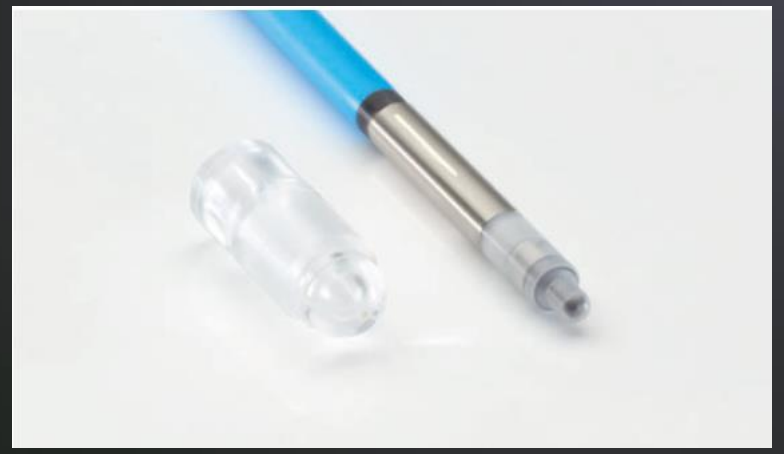


Θάλαμοι ιονισμού αερίου

Αέριο: αέρας (συνήθως)
Ενεργός όγκος

- από ~0.01cc (ακτινοθεραπεία και ακτινολογία),
- έως >1000cc περιβαλλοντικές μετρήσεις \ σταθεροί μετρητές χώρου

Τύπου **κοιλότητας**



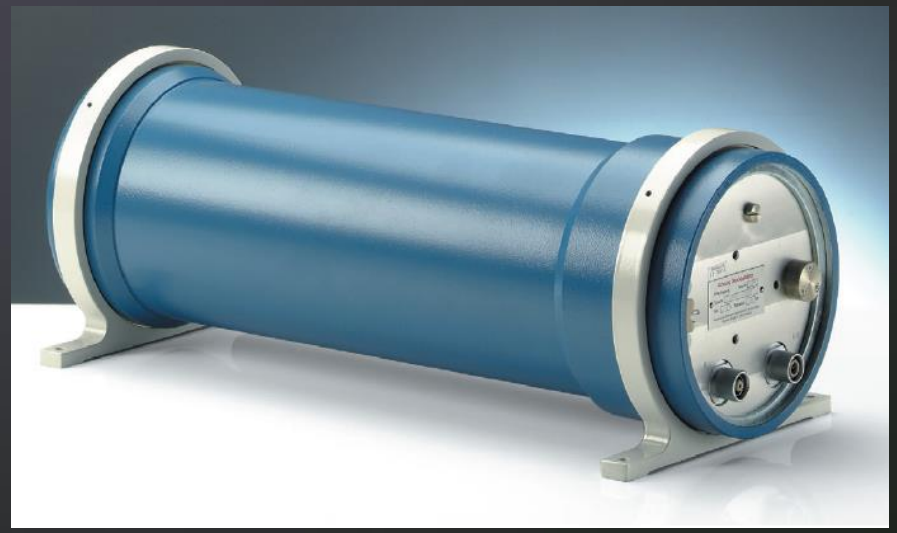
Τύπου **παραλλήλων πλακών** (parallel plate για ακτινολογία ή φορτισμένα)

Θάλαμοι ιονισμού αερίου

Θάλαμος ιονισμού pencil-type για δοσιμετρία Αξονικού Τομογράφου (ΥΤ – CT)

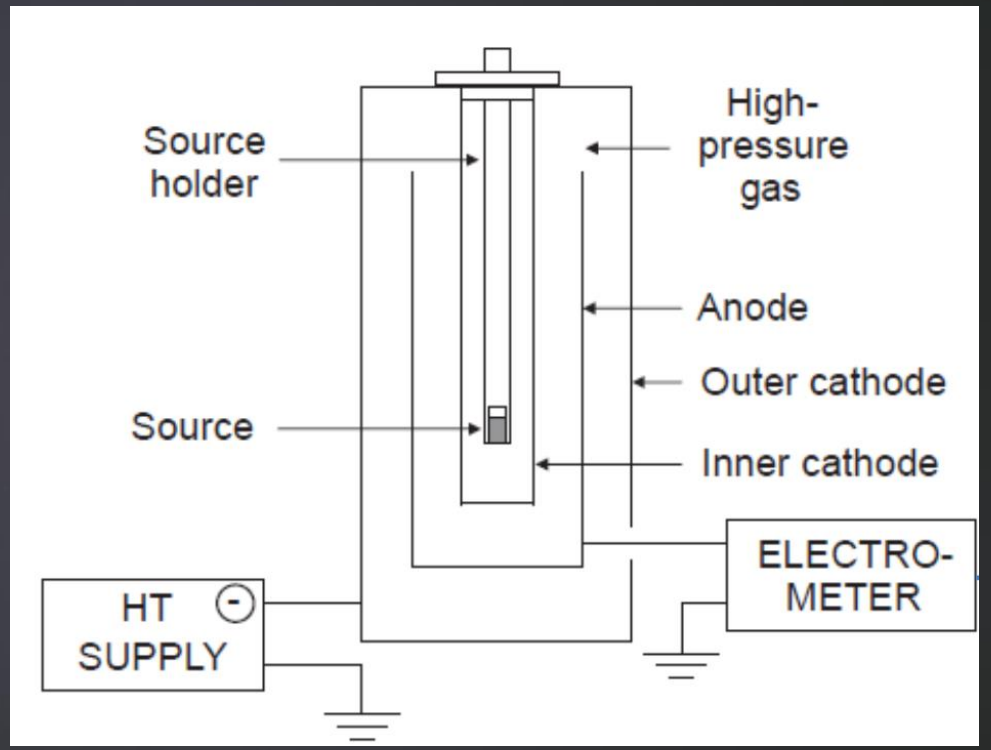
Ενδεικτικά: μήκος κοιλότητας 100 mm

Θάλαμοι ιονισμού για περιβαλλοντικές μετρήσεις: έχουν πολύ μεγάλους ενεργούς όγκου, π.χ., 3L και 50L:



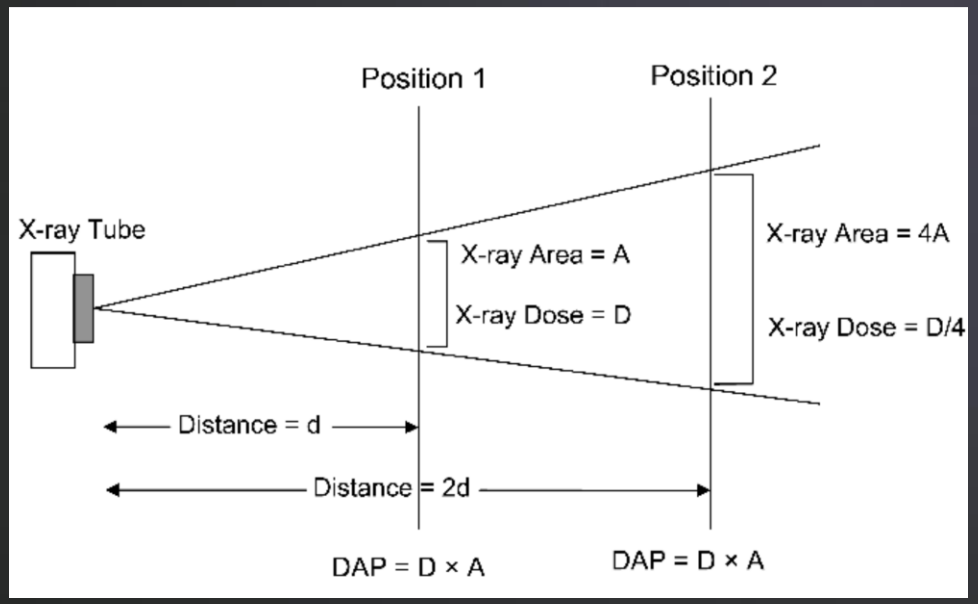
Θάλαμοι ιονισμού αερίου

Θάλαμος ιονισμού τύπου **φρέατος** (πηγαδιού – **well type**) για μετρήσεις ενεργότητας ραδιοφαρμάκου στην πυρηνική ιατρική
Συνήθως φέρουν αέριο σε υψηλή πίεση περιμετρικά του δείγματος



Θάλαμοι ιονισμού αερίου

Μετρητές τύπου **DAP** (Dose Area Product – DAP meters) ή **KAP** (KERMA Area Product – KAP meters)
Χρησιμοποιούνται στην ακτινολογία (π.χ., ακτινοσκόπηση) και δίνουν το γινόμενο (δόσης επί επιφάνεια) ή (KERMA επί επιφάνεια).
Μονάδες: mGy cm^2
Αυτό το μέγεθος είναι ανεξάρτητο της απόστασης λυχνίας-ασθενούς
Με χρήση κατάλληλων παραγόντων και παραδοχών, από το DAP μπορεί να γίνει μια αδρή εκτίμηση της ενεργού δόσης στον ασθενή



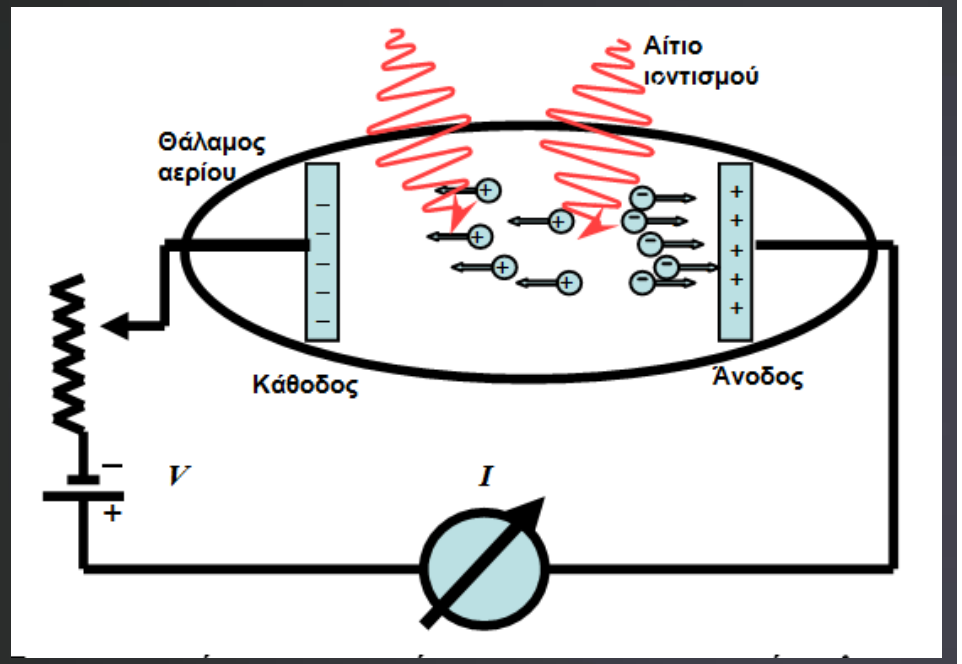
Θάλαμοι ιονισμού αερίου

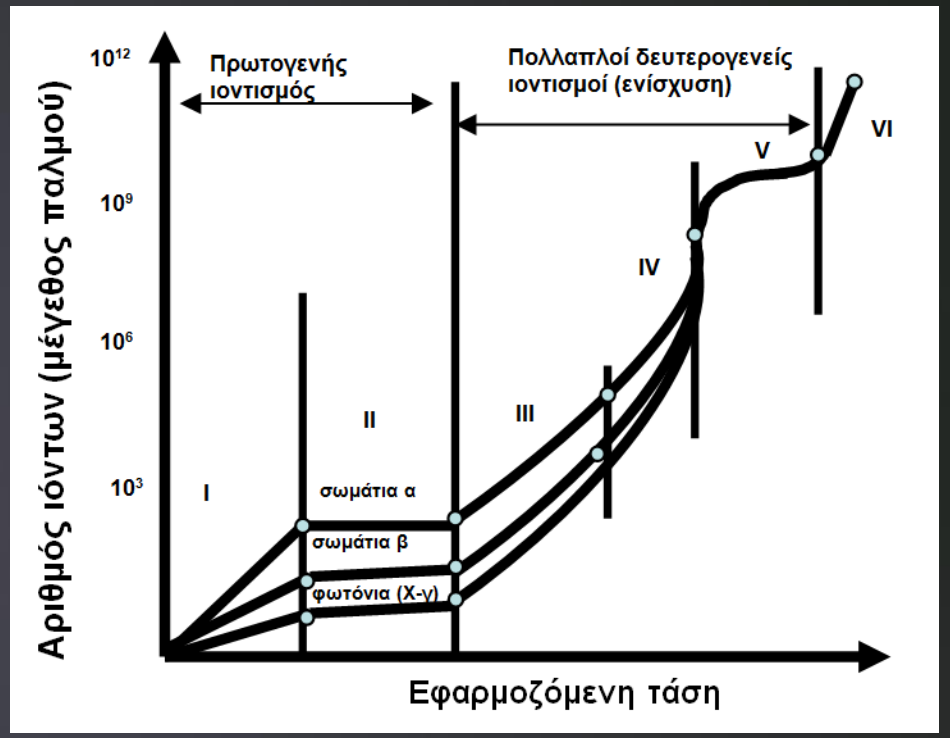
Φορητός θάλαμος ιονισμού survey meter για δοσιμετρία χώρου

Αέριο υπό πίεση 6atm για αύξηση ευαισθησίας
Περισσότερη μάζα αέρα, άρα υψηλότερο σήμα σε σχέση με θαλάμους ανοιχτού τύπου (~1atm)

Θάλαμος ιονισμού VS Geiger-Müller: ο ΘΙ δεν είναι GM

Λειτουργούν υπό εντελώς διαφορετική εφαρμοζόμενη υψηλή τάση



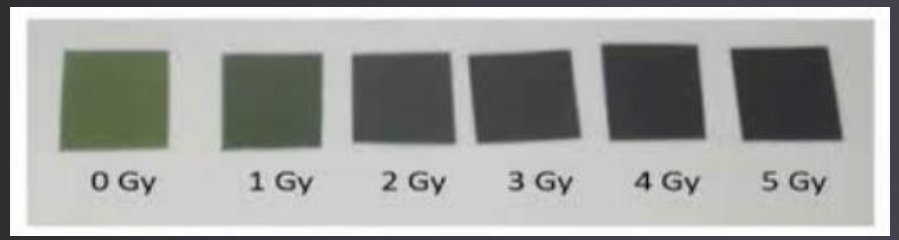


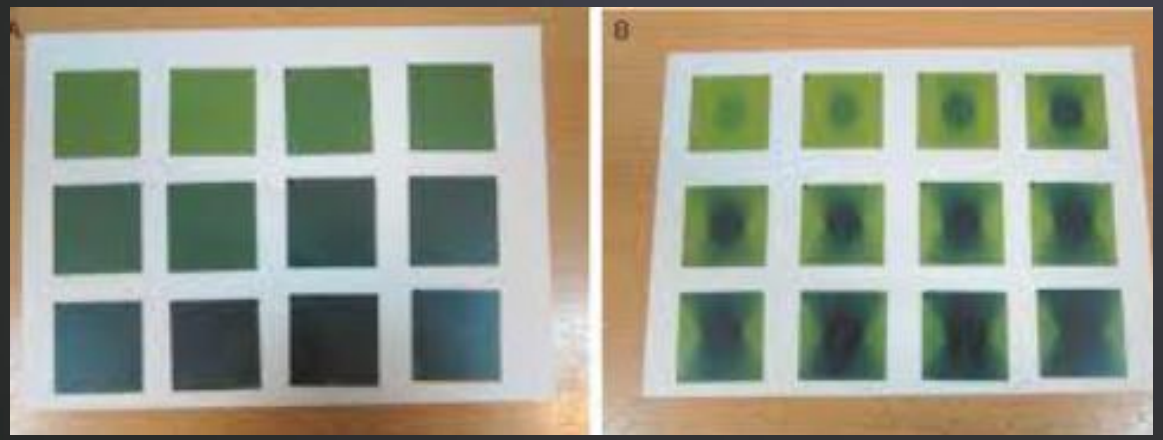
I. Περιοχή επανασύνδεσης
II. Περιοχή θαλάμων ιονισμού
III. Αναλογική περιοχή
IV. Περιορισμένα αναλογική περιοχή
V. Περιοχή G-M
VI. Περιοχή συνεχούς εκφώρτησης

Άλλα δοσίμετρα δεν υπάρχουν ???

Τύπος δοσιμέτρου	Μηχανισμός ανίχνευσης – Προέλευση σήματος
Θερμιδόμετρο (καλορίμετρο) νερού	Αύξηση θερμοκρασίας στο νερό
Θάλαμος ιονισμού αερίου	Ιονισμός στο αέριο - Συλλογή φορτίων στο αέριο και καταγραφή από ηλεκτρόμετρο
Ημιαγωγός σιλικόνης (δίοδος Si)	Ιονισμός στη σιλικόνη – Συλλογή φορτίου και καταγραφή από ηλεκτρόμετρο
Ημιαγωγός γραφίτη (δίοδος διαμαντιού)	Ιονισμός στο διαμάντι – Συλλογή φορτίου και καταγραφή από ηλεκτρόμετρο
Σπινθηριστής	Εκπομπή φωτός από τον κρύσταλλο - Μέτρηση φωτός με τη βοήθεια φωτοπολλαπλασιαστή
Θερμοφωταύγειας (Thermolumiscent Dosimeter – TLD)	Ιονισμός του υλικού - Μέτρηση φωτός κατά την ανάγνωση από φωτοπολλαπλασιαστή
Φωτοφωταύγειας (Optically stimulated luminescence dosimeter - OSLD)	Ιονισμός του υλικού - Μέτρηση φωτός κατά την ανάγνωση από φωτοπολλαπλασιαστή
Ραδιοχρωμικό φιλμ	Χημικές διεργασίες πολυμερισμού – Μέτρηση μεταβολή οπτικής πυκνότητας
Πολυμερισμού γέλης	Πολυμερισμός μονομερών – Μέτρηση Μεταβολής χρόνου αποκατάστασης T2 (NMR) ή μεταβολή οπτικής πυκνότητας
Fricke δοσίμετρο	Οξείδωση Fe^{2+} - Μεταβολή οπτικής πυκνότητας

Άλλα δοσίμετρα: σημειακά, 2D, 3D





Ποιο δοσίμετρο να επιλέξω ???

Δοσίμετρο: κάθε σύστημα που παράγει ένα μετρήσιμο σήμα όταν εκτίθεται σε ιονίζουσα ακτινοβολία.

Επιθυμητά χαρακτηριστικά ενός δοσιμέτρου:

(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, Τ, Ρ, 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

Απόλυτη έναντι Σχετικής δοσιμετρίας

- Απόλυτα δοσίμετρα (π.χ., θερμιδόμετρα και θάλαμοι ιονισμού): δεν απαιτούν βαθμονόμηση για τη μέτρηση της δόσης. Παρόλα αυτά οι θάλαμοι ιονισμού βαθμονομούνται για να βελτιωθεί η ακρίβεια.
- Άλλα δοσίμετρα ονομάζονται **σχετικά δοσίμετρα:** πρέπει να βαθμονομηθούν έναντι ενός απόλυτου δοσιμέτρου.
- Για όλα τα δοσίμετρα ακολουθούνται αυστηρά μετρολογικά πρότυπα και πρωτόκολλα