

Ιατρική Φυσική
Ε.Κ.Π.Α. 2025-2026
Ε. Στυλιάρης – Π. Παπαγιάννης

Ακτινοπροστασία:

- Βιολογικές επιδράσεις ιοντιζουσών ακτινοβολιών
- Διεθνές σύστημα ακτινοπροστασίας

Δοσιμετρία:

- Εξωτερική (υπολογιστική, **πειραματική**)

Π. Ι. Παπαγιάννης

Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής
Ιατρική Σχολή Αθηνών



210 7462442



ppapagi@med.uoa.gr



<http://mpl.med.uoa.gr/>

Πειραματική δοσιμετρία

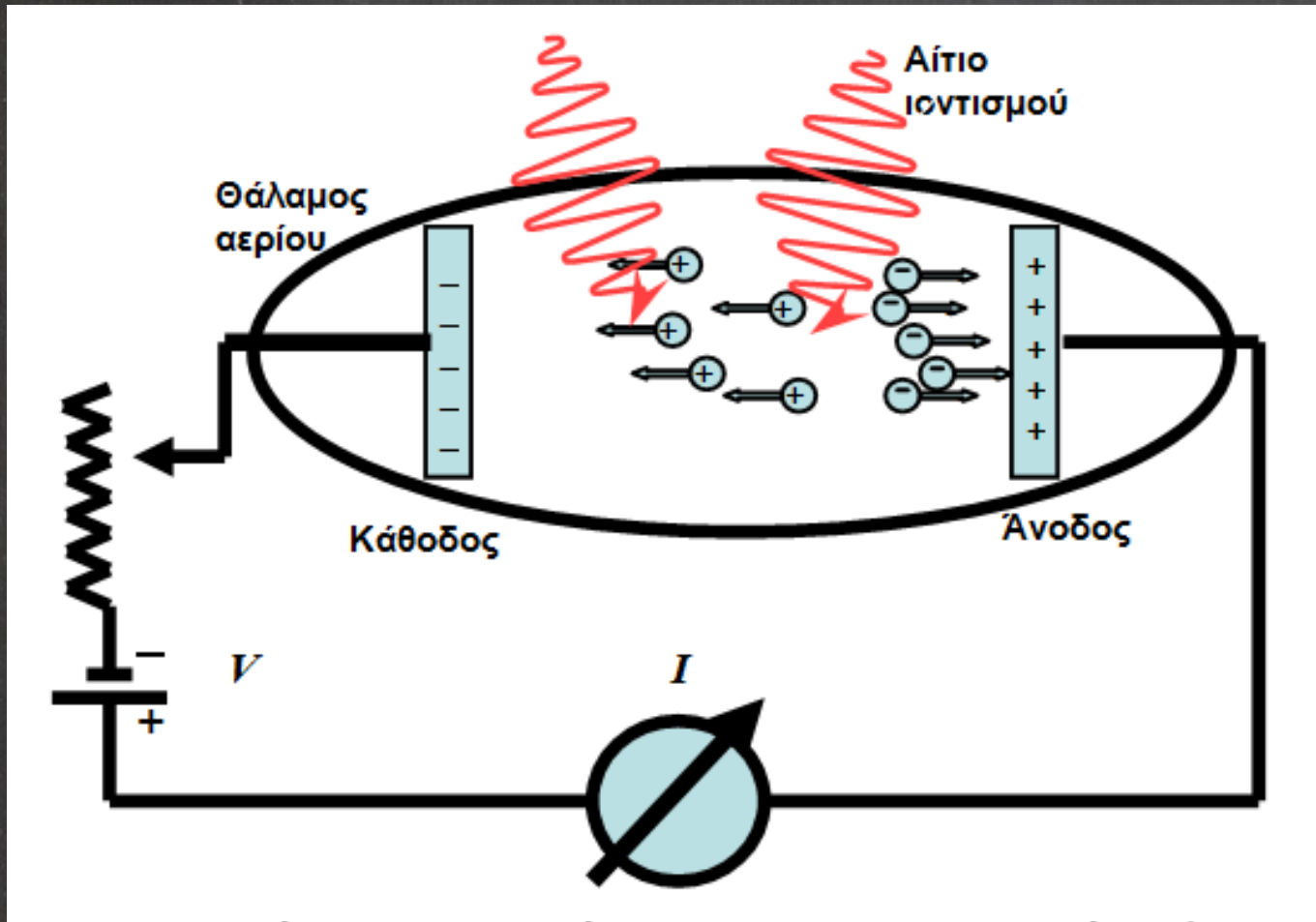
Γενικά χαρακτηριστικά δοσιμετρικών συστημάτων

- Οποιοδήποτε σύστημα παράγει μετρήσιμο σήμα (έστω M) το οποίο συναρτάται της δόσης ιοντίζουσας ακτινοβολίας, D , που απορρόφησε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δοσίμετρο.
- Ο λόγος M/D καλείται απόκριση (R , response) ή ευαισθησία (S , sensitivity) του δοσιμέτρου.
- Το αντίστροφο αποτελεί το συντελεστή βαθμονόμησης, N .
- Δοσίμετρα για τα οποία η σχέση που συνδέει τα M , D είναι γνωστή από θεμελιώδεις φυσικές αρχές (καλορίμετρα, θάλαμοι ιονισμού, χημικά δοσίμετρα Fricke, δοσίμετρα αλανίνης) καλούνται **απόλυτα δοσίμετρα**. Δεν απαιτείται η βαθμονόμησή τους παρά μόνον αν απαιτείται περιορισμός της αβεβαιότητας μέτρησης.
- Οποιοδήποτε άλλο δοσίμετρο καλείται **σχετικό δοσίμετρο** καθώς χρειάζεται βαθμονόμηση σε σχέση με ένα απόλυτο δοσίμετρο, ανεξάρτητα από την απαιτούμενη ακρίβεια.

Επιθυμητά χαρακτηριστικά δοσιμέτρων

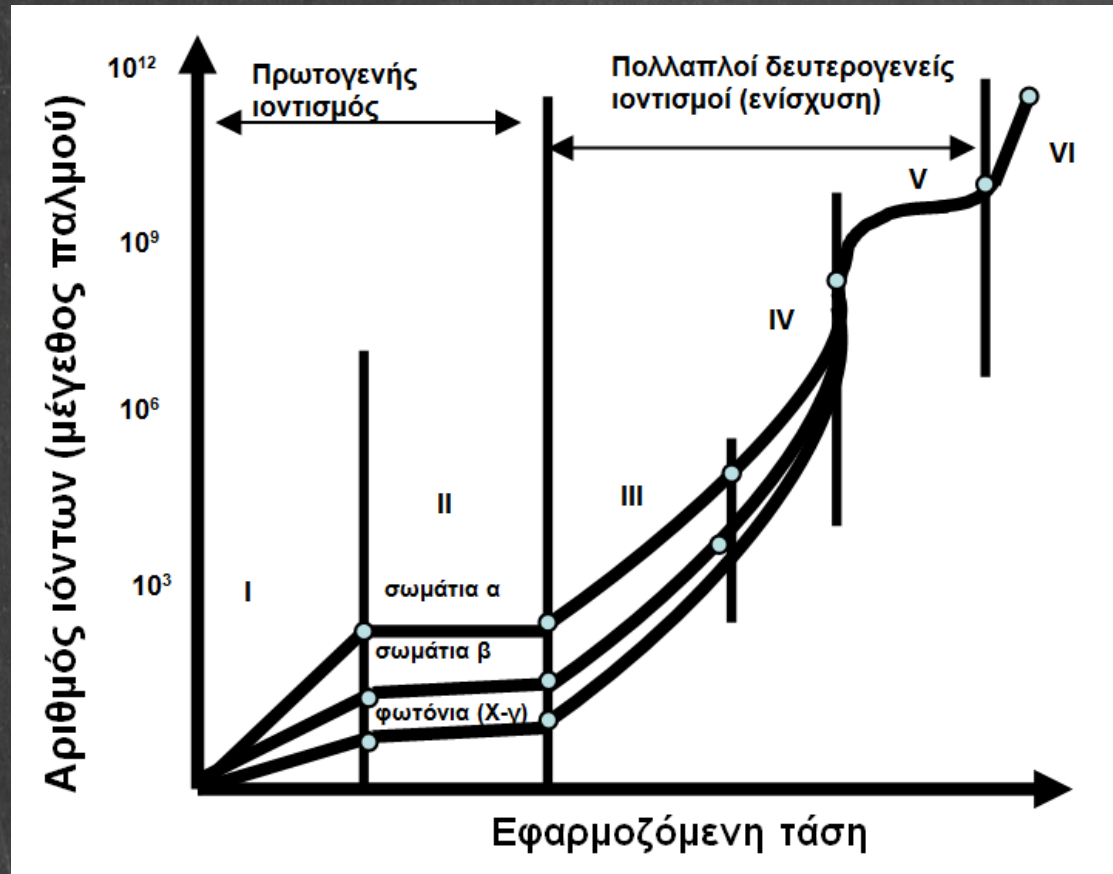
- (1) Ευαισθησία: αρκετά υψηλή για μέτρηση χαμηλών δόσεων/ρυθμών δόσης. Αν είναι πολύ υψηλή θα προκληθεί κορεσμός σε αυξημένη δόση/ρυθμό δόσης
- (2) Επαρκές εύρος μετρούμενων δόσεων και (κατά προτίμηση) γραμμικότητα απόκρισης συναρτήσει δόσης
- (3) Ανεξαρτησία μέτρησης από τρίτους παράγοντες όπως ρυθμός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

Τα ευρύτερα κλινικά χρησιμοποιούμενα δοσίμετρα είναι
οι θάλαμοι ιονισμού : βασικές αρχές



Θάλαμοι ιονισμού : βασικές αρχές

Μέγεθος παραγόμενου ηλεκτρικού παλμού σε σχέση με το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο



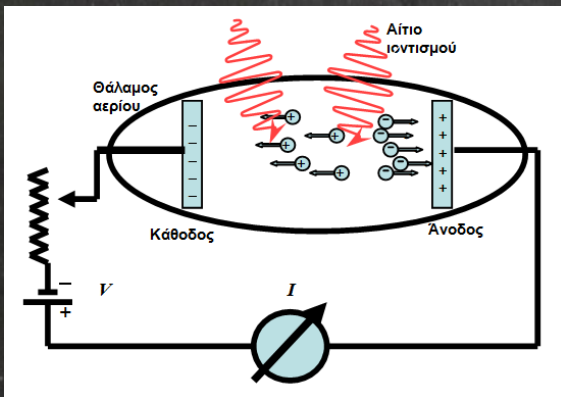
Θάλαμοι ιονισμού : βασικές αρχές

• Έστω $(\overline{W}/e)_{air}$ η μέση ενέργεια που χρειάζεται για την παραγωγή ζεύγους ιόντων σε αέρα υπό δεδομένες συνθήκες.

• π.χ. $(\overline{W}/e)_{air} = 33.97 \text{ eV/e} = 33.97 \text{ J/C}$
για **ξηρό αέρα**

• η τιμή αυτή διαφέρει μεταξύ διαφορετικών φορτισμένων σωματιδίων

• η τιμή αυτή είναι **περίπου σταθερή** για ενέργειες ηλεκτρονίων $>10 \text{ keV}$ και μεταβάλλεται 2% από 1 keV έως 10 keV



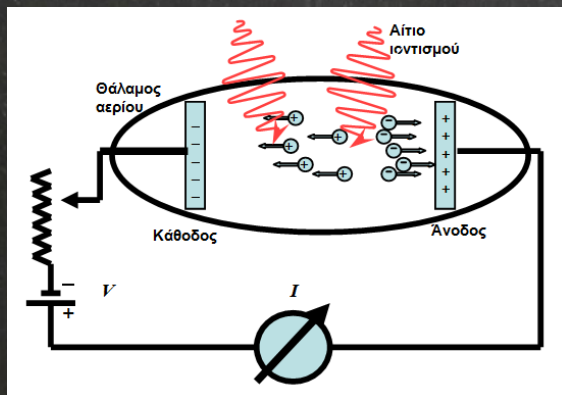
Θάλαμοι ιονισμού : βασικές αρχές

Δεδομένου του $(\bar{W}/e)_{air}$, υπό συνθήκες CPE:

$$\frac{Q_{air}}{m} = \frac{K_{Col,air}}{(\bar{W}/e)_{air}}$$

Οπότε υπό συνθήκες CPE:

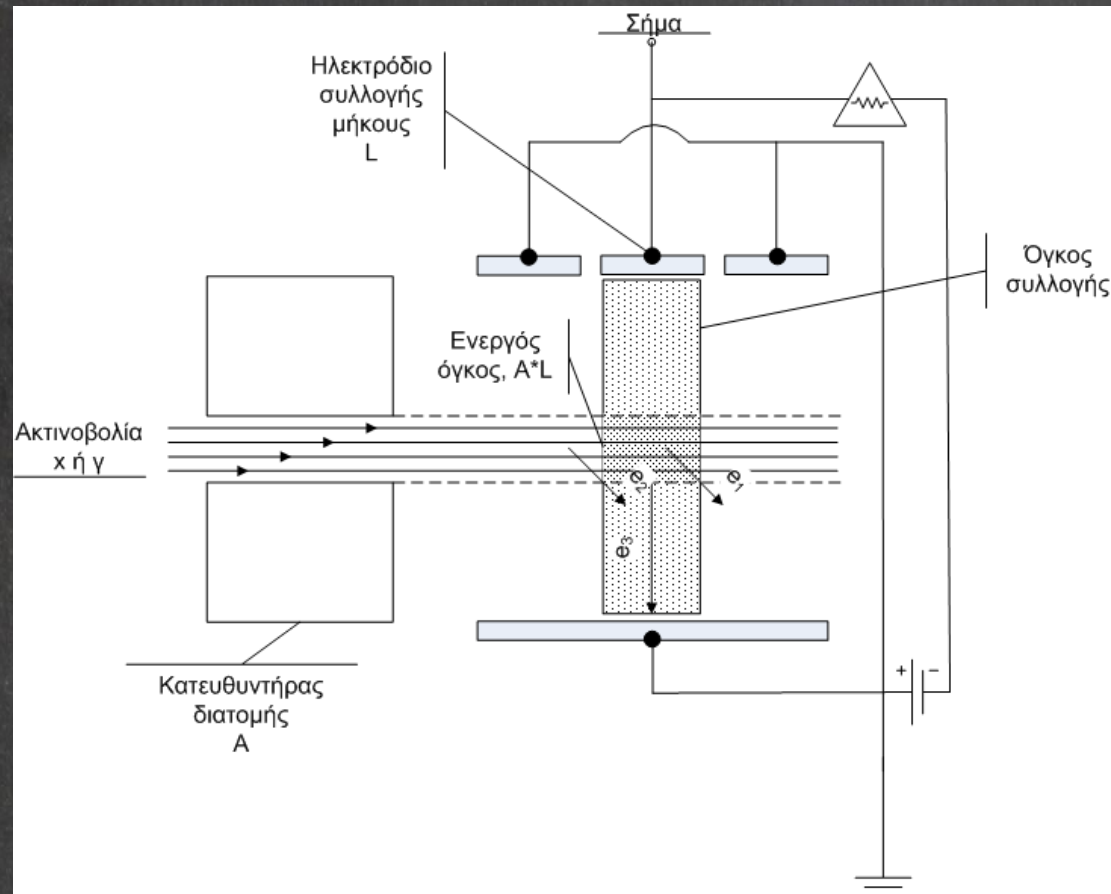
$$D_{air} = K_{Col,air} = Q_{air} \frac{(\bar{W}/e)_{air}}{m}$$



Παρατηρείστε ότι για τους θαλάμους ιονισμού:

$$M = Q_{air} \text{ και } N_{D,air} = \frac{(\bar{W}/e)_{air}}{m}$$

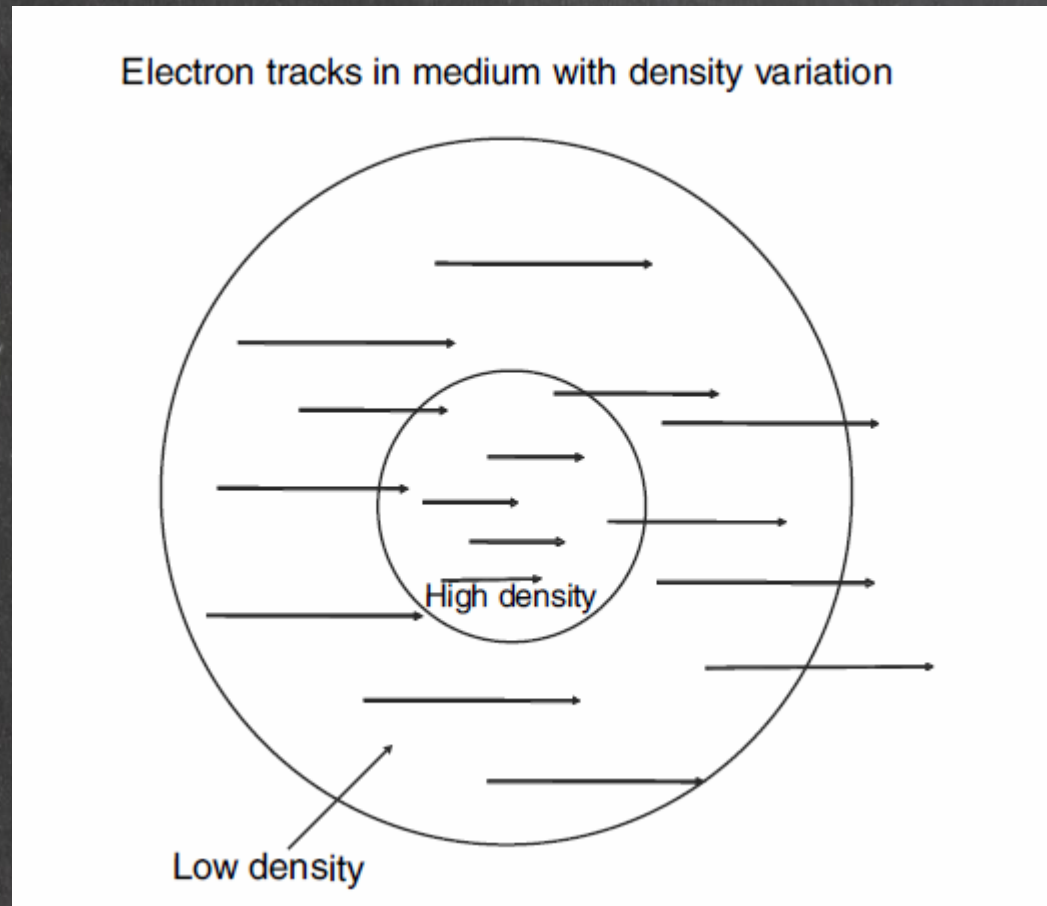
CPE και θάλαμοι ιονισμού: free air chamber



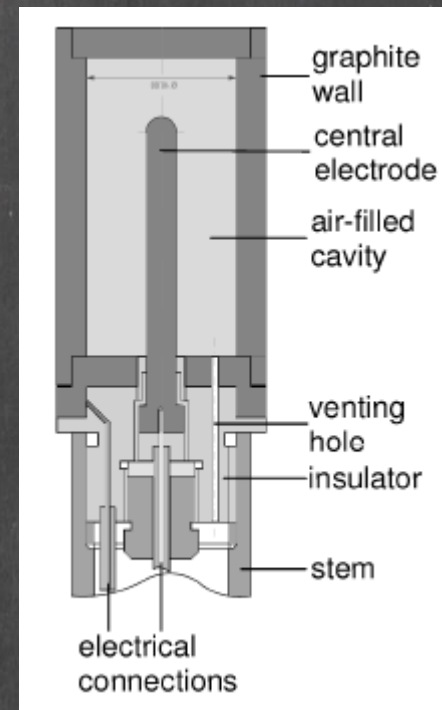
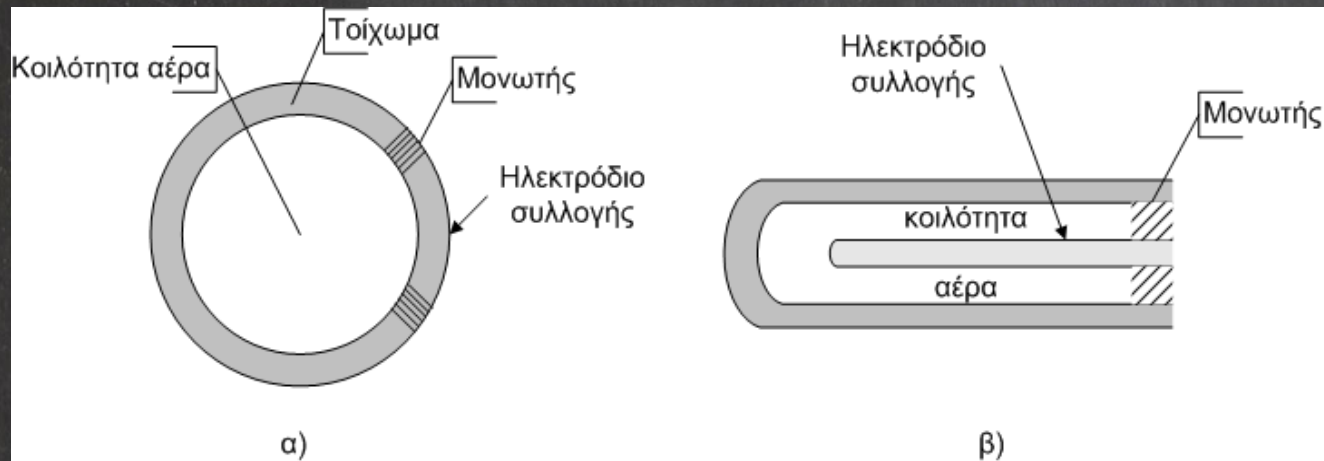
- Μεγάλου μεγέθους και δύσχρηστο όργανο ακόμα και σε χαμηλές E φωτονίων
- Χρησιμοποιείται ως πρότυπο για δέσμες $X < 300$ kV
 - Για κλινική χρήση / υψηλότερες ενέργειες?

Το θεώρημα Fano:

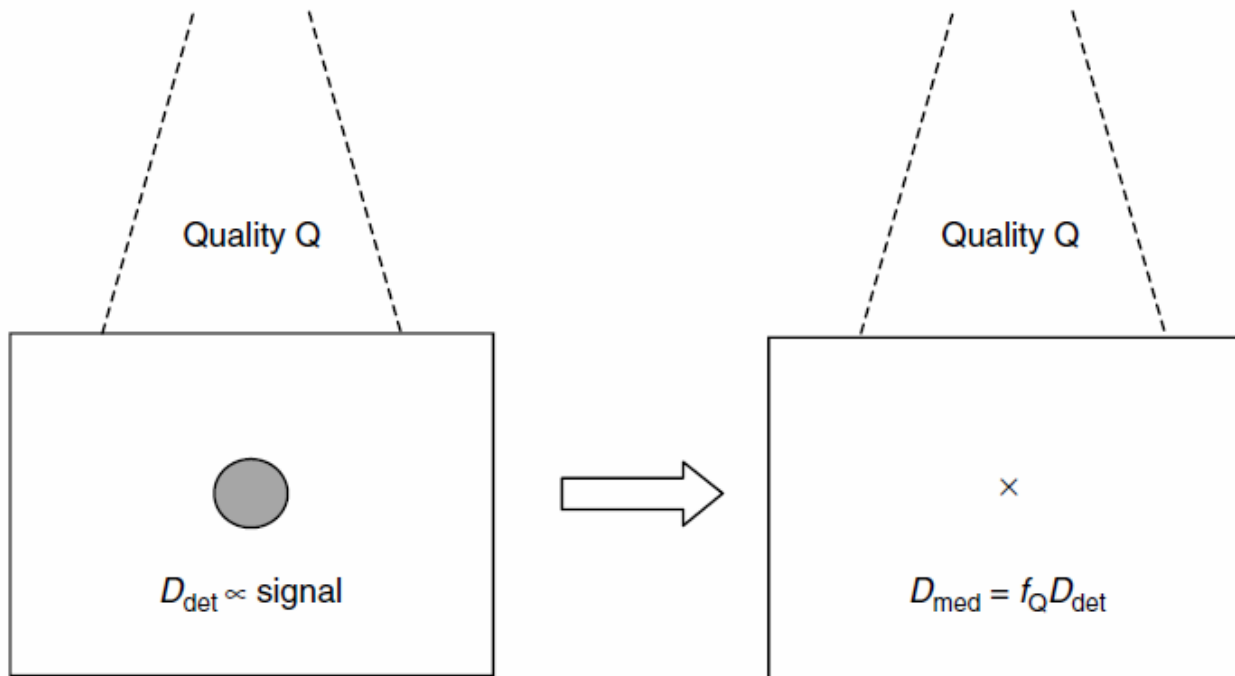
σε μέσο δεδομένης σύστασης που εκτίθεται σε ομοιόμορφη ροή έμμεσα ιοντίζουσας ακτινοβολίας, η ροή της δευτερογενούς ακτινοβολίας είναι επίσης ομοιόμορφη ανεξάρτητα από την πυκνότητα του μέσου ή διακυμάνσεων αυτής



Θάλαμοι ιονισμού τύπου κοιλότητας αερίου:



Από τη δόση στον ανιχνευτή (det) στη δόση στο μέσο (m) που
τον περιβάλλει:
«θεωρίες κοιλότητας»

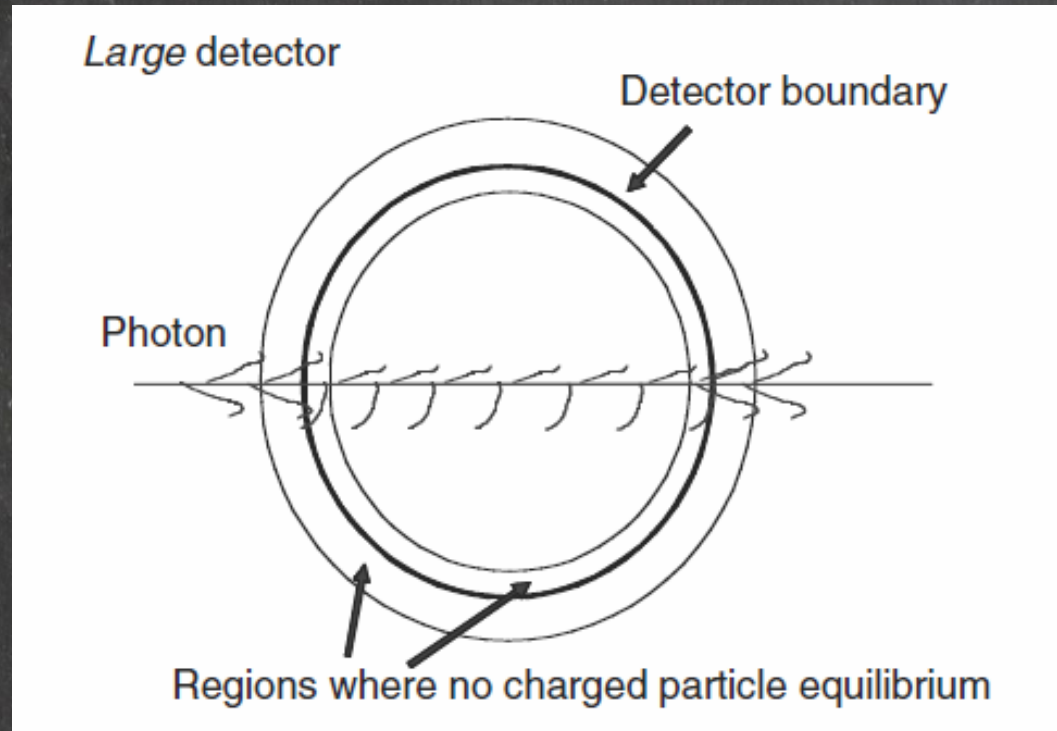


$$f_Q = ???$$

όπου Q η ενέργεια ή «ποιότητα» της δέσμης

Περίπτωση Α: (large cavity)

διάσταση κοιλότητας μεγαλύτερη από τη μέγιστη εμβέλεια e-
(αλλά μικρότερη από τη μέση ελεύθερη διαδρομή των φωτονίων)



ο θάλαμος λειτουργεί ως «ανιχνευτής φωτονίων» και:

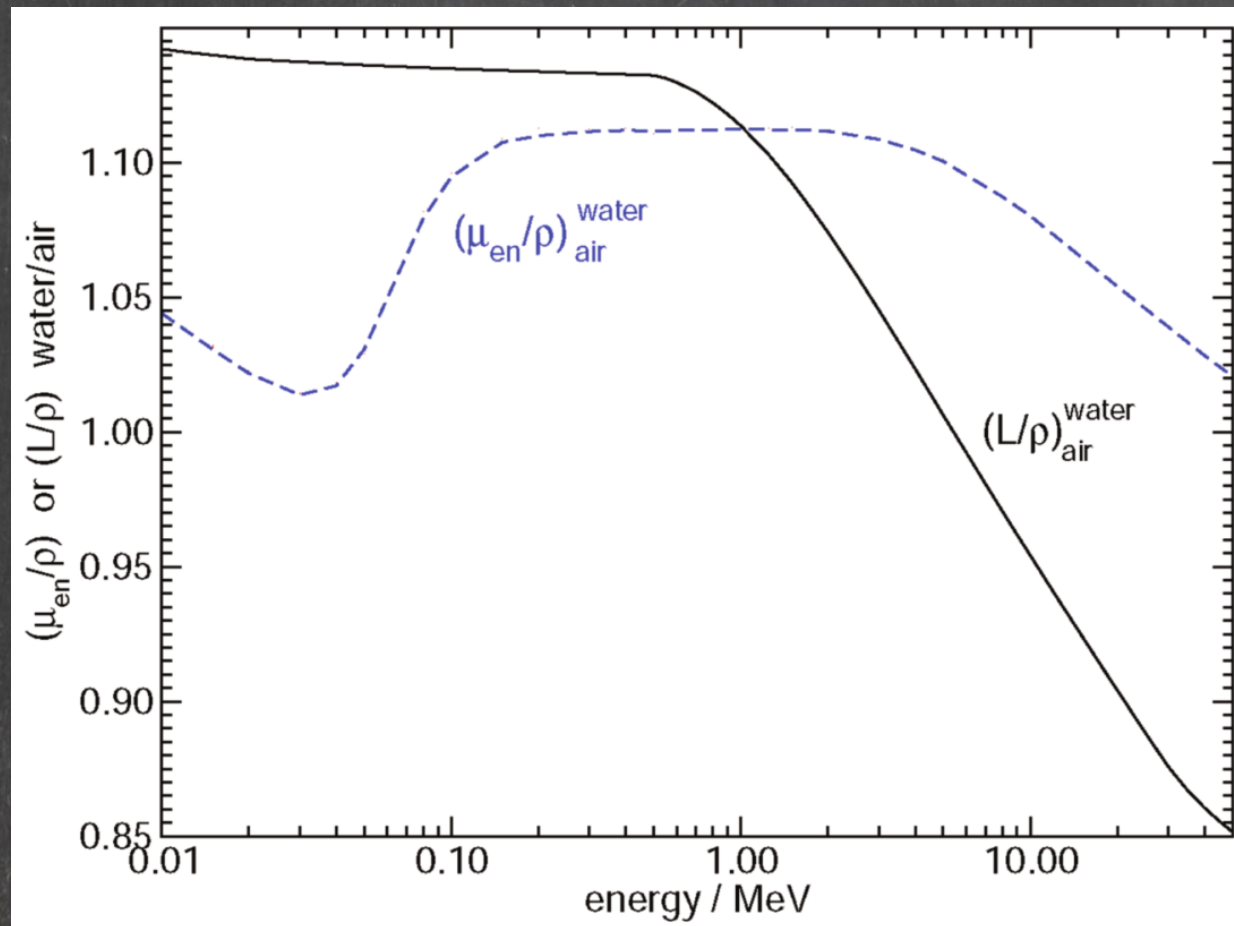
$$f_Q = \frac{(\mu_{en}/\rho)_m}{(\mu_{en}/\rho)_{det}} = (\mu_{en}/\rho)_{det}^m$$

Περίπτωση Α: (large cavity)

διάσταση κοιλότητας μεγαλύτερη από τη μέγιστη εμβέλεια e-
(αλλά μικρότερη από τη μέση ελεύθερη διαδρομή των φωτονίων)

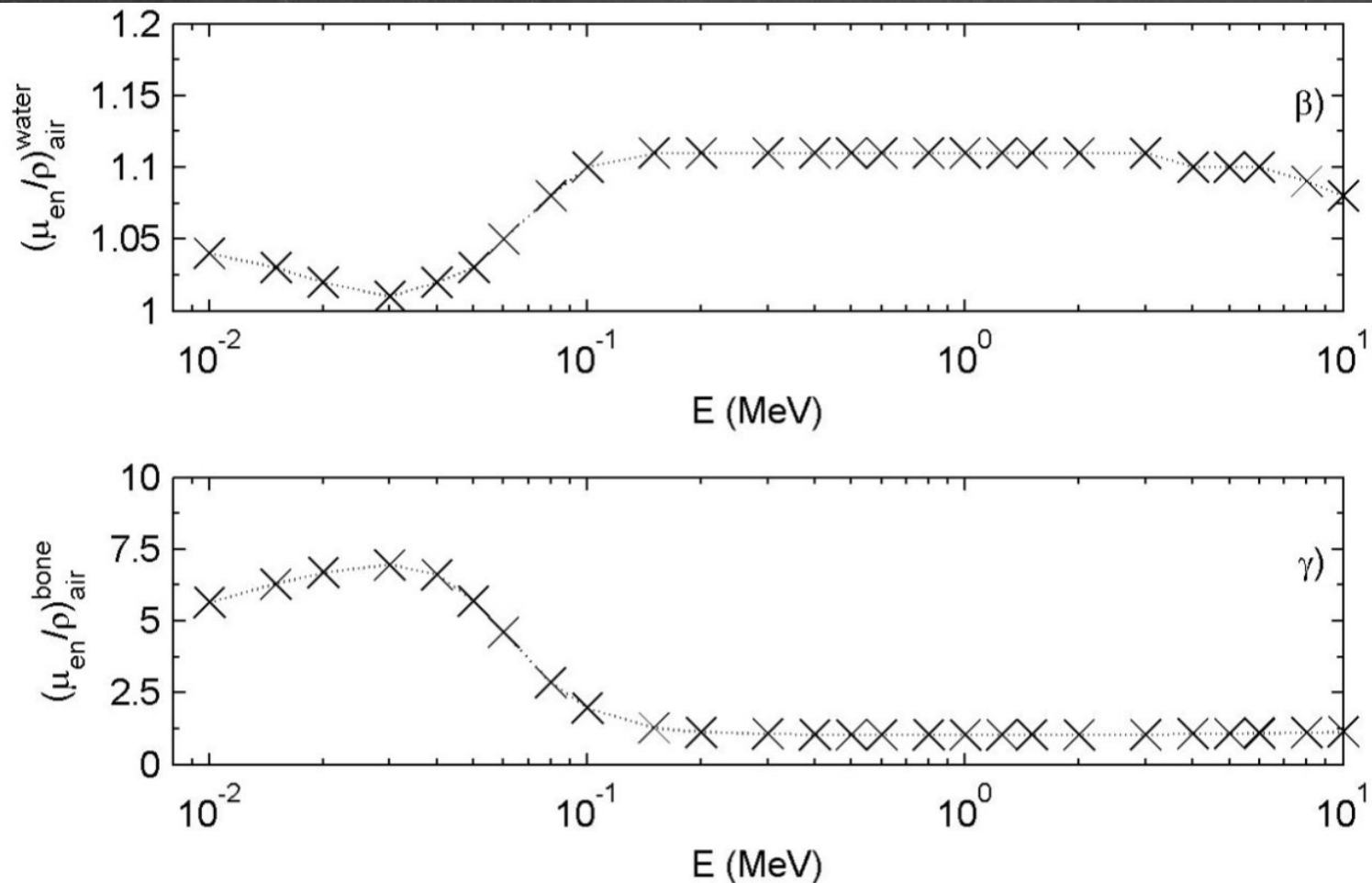
$$f_Q = (\mu_{en}/\rho)_{det}^m$$

Material	Photoelectric Effect Z_{eff}	Compton Effect e^-/g
Silicon (diodes) ^a	14	3×10^{23}
LiF (Mg, Ti) ^b	8.14	2.79×10^{23}
LiF (Mg, Ti, Na) ^b	8.14	2.79×10^{23}
Li ₂ B ₄ O ₇ :Mn ^b	7.4	2.92×10^{23}
Li ₂ B ₄ O ₇ :Cu ^c	7.4	2.92×10^{23}
CaSO ₄ :Mn ^b	15.3	3.02×10^{23}
CaSO ₄ :Dy ^b	15.3	3.03×10^{23}
CaF ₂ :Mn ^b	16.3	2.95×10^{23}
CaF ₂ :Dy ^b	16.3	2.95×10^{23}
Air ^d	7.64	3.03×10^{23}
Water ^d	7.42	3.34×10^{23}
Fat ^d	5.92	3.48×10^{23}
Muscle ^d	7.42	3.36×10^{23}
Bone ^d	14	3×10^{23}



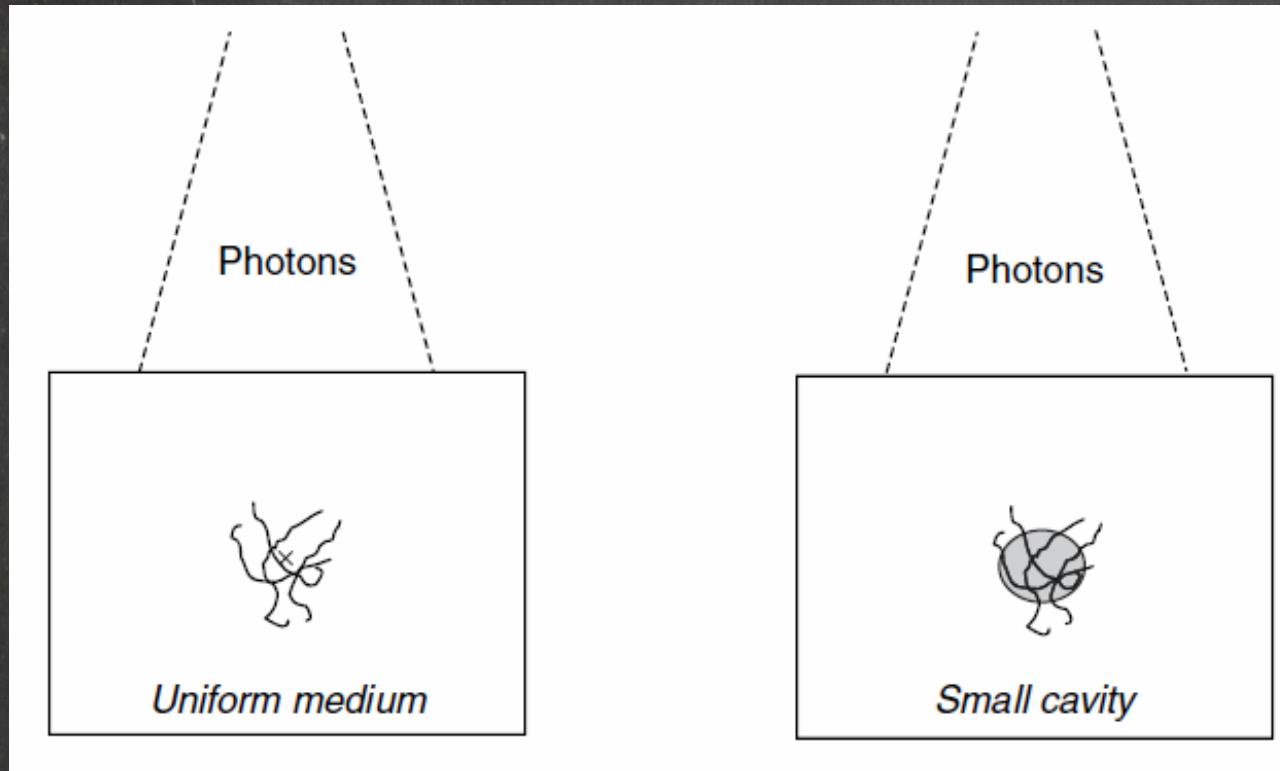
Περίπτωση Α: (large cavity)

διάσταση κοιλότητας μεγαλύτερη από τη μέγιστη εμβέλεια e-
αλλά μικρότερη από τη μέση ελεύθερη διαδρομή των φωτονίων



Περίπτωση Β: (κοιλότητα Bragg-Gray)

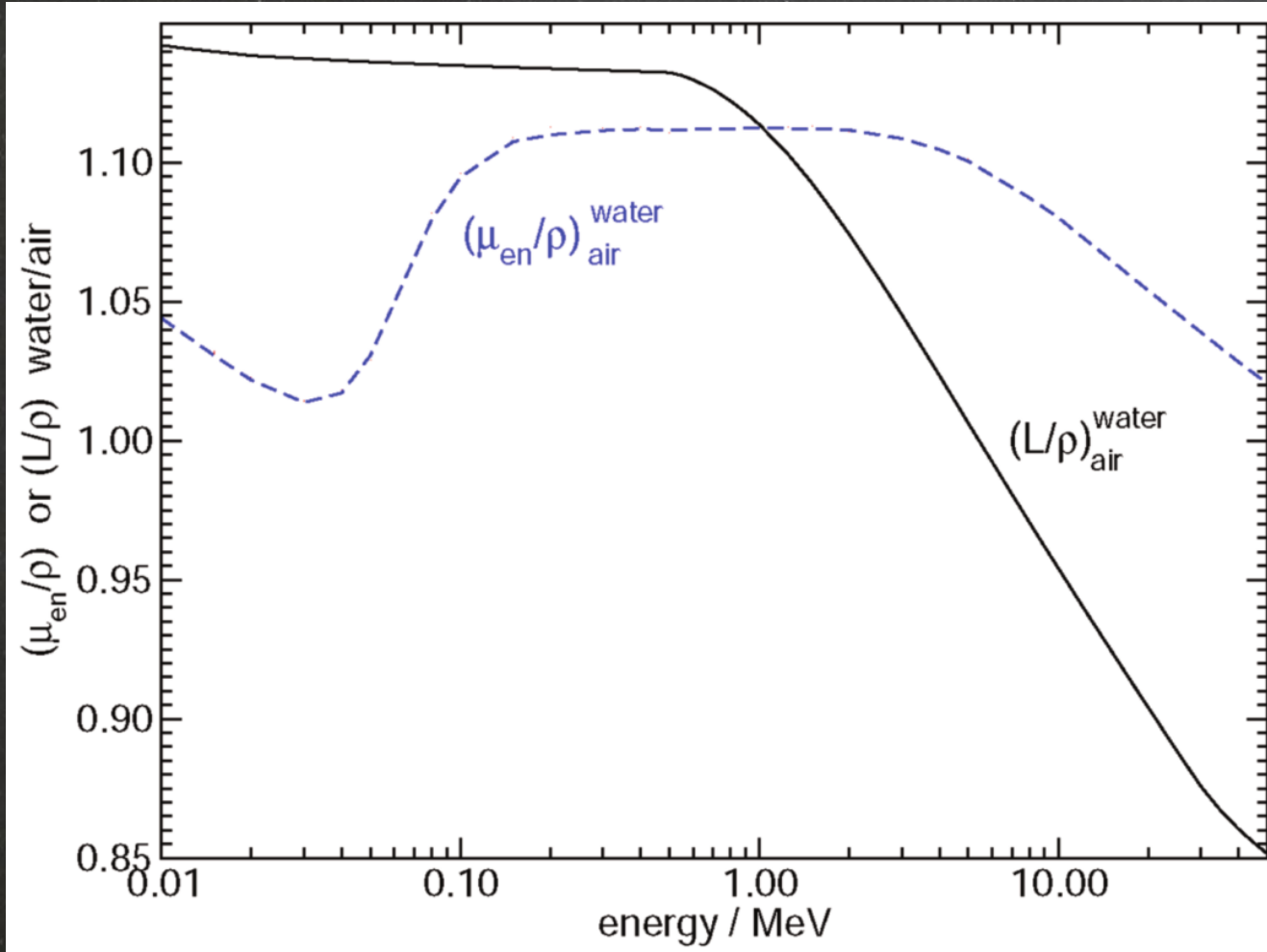
διάσταση κοιλότητας μικρή σε σχέση με την εμβέλεια e



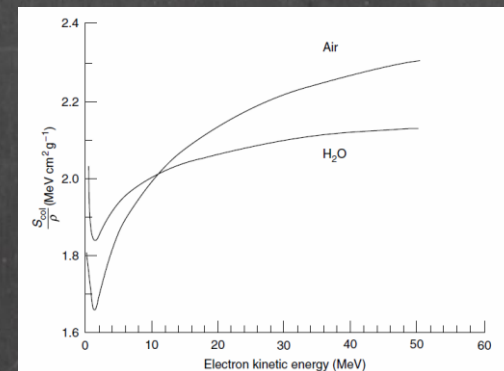
ο θάλαμος λειτουργεί ως «ανιχνευτής ηλεκτρονίων» και:

$$f_Q = \frac{(S/\rho)_m}{(S/\rho)_{det}} = (S/\rho)_{det}^m$$

Περίπτωση Β:
(κοιλότητα Bragg-Gray)
διάσταση κοιλότητας μικρή σε σχέση με την εμβέλεια e

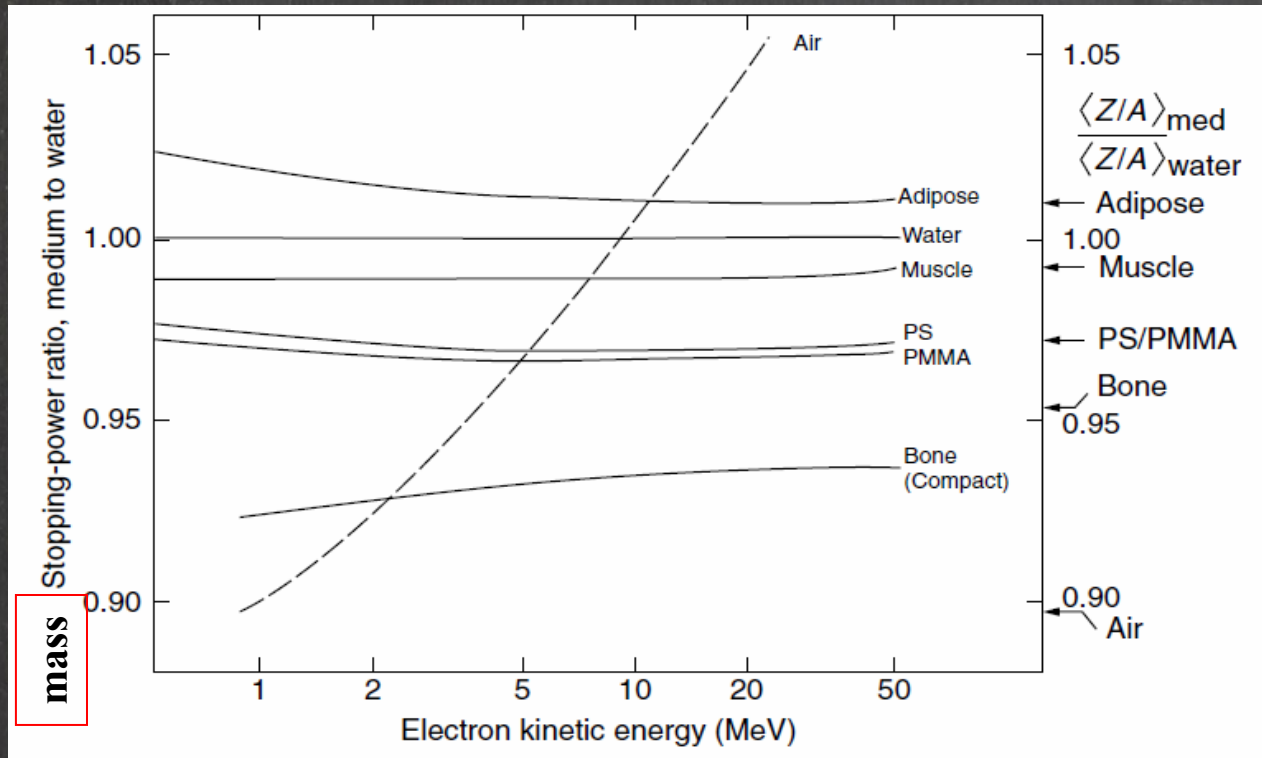


$$f_Q = (S/\rho)_{det}^m$$



Περίπτωση Β:
(κοιλότητα Bragg-Gray)
διάσταση κοιλότητας μικρή σε σχέση με την εμβέλεια e

$$f_Q = (S/\rho)_{det}^m$$



Χρήση θαλάμων ιονισμού

Οι θάλαμοι ιονισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς βαθμονόμηση με ακρίβεια περί το $\pm 5\%$:

$$D_{w,Q} = M_{w,Q} \left(\frac{D_{air,Q}}{M_{w,Q}} \right) \left(\frac{D_{w,Q}}{D_{air,Q}} \right) = M_{w,Q} N_{D,w,Q} f_Q = M_{w,Q} \frac{(\bar{W}/e)_{air}}{m} f_Q$$

Μικρές διορθώσεις απαιτούνται για:

- μάζα αερίου, m
- παράγοντας διαταραχής πεδίου (perturbation factor, $p_{ch,Q}$) λόγω τοιχώματος, ηλεκτροδίου, στελέχους, και αντικατάστασης υλικού
- απόδοση συλλογής φορτίου
- density (polarization effect)
- ...

Για βελτίωση της ακρίβειας οι κλινικά χρησιμοποιούμενοι θάλαμοι ιονισμού **βαθμονομούνται** με ιχνηλασιμότητα σε διεθνή πρότυπα.

Απόλυτη (Absolute) δοσιμετρία

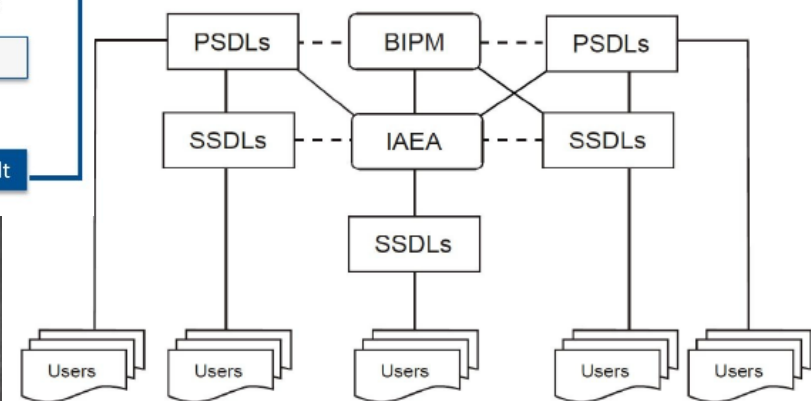
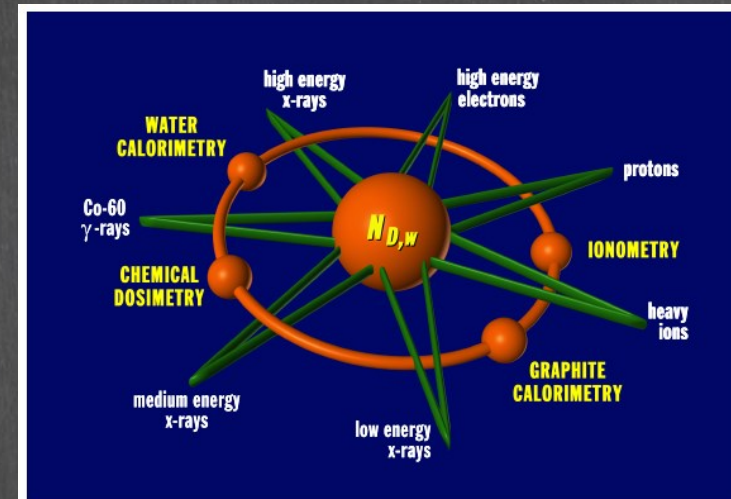
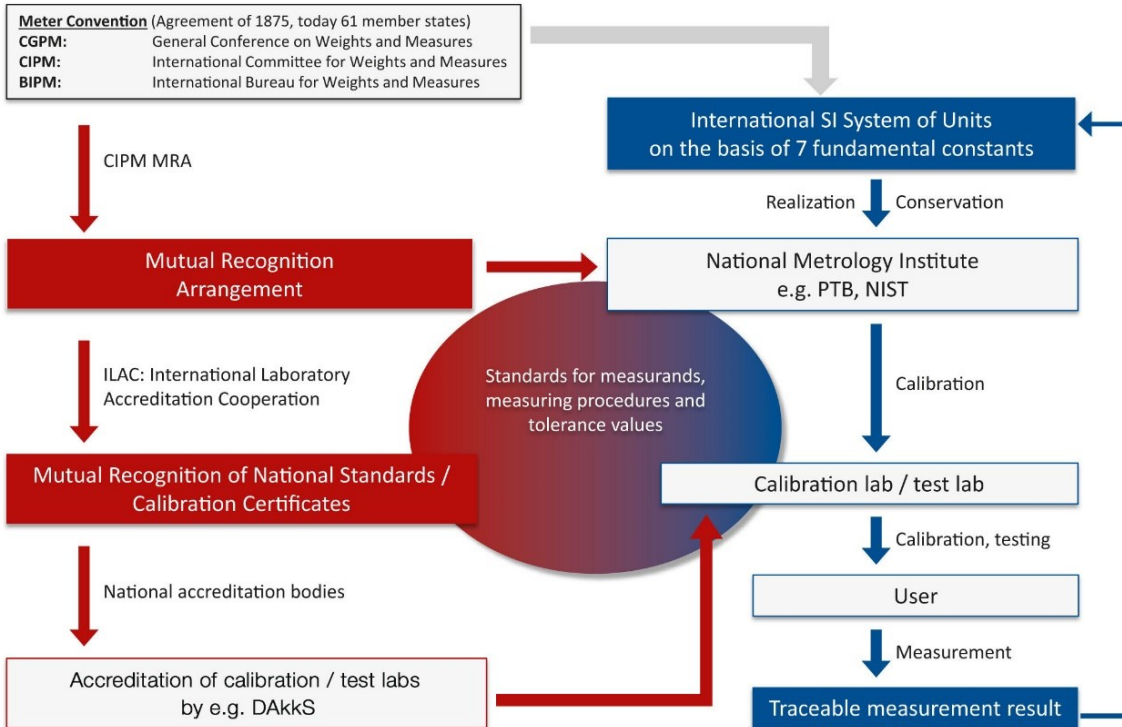
Το μέγεθος ενδιαφέροντος (Δόση/Kerma):

- 1) προσδιορίζεται από θεμελιώδεις αρχές που συνάδουν με τον ορισμό του
- 2) πραγματοποιείται με ένα πρωτεύον (primary) μετρητικό πρότυπο (standard).

Ένα πρωτεύον πρότυπο είναι ένα όργανο της υψηλότερης μετρολογικής ποιότητας που επιτρέπει τον προσδιορισμό της μονάδας ενός μεγέθους από τον ορισμό του (αποτελεί δηλαδή ένα απόλυτο δοσίμετρο), και η ακρίβεια του οποίου έχει επαληθευτεί μέσω διασύγκρισης με αντίστοιχα πρότυπα άλλων ιδρυμάτων που συμμετέχουν στο Διεθνές Σύστημα Μετρολογίας. Πρωτεύοντα πρότυπα τηρούνται σε πρότυπα εργαστήρια μετρολογίας (Primary Standard Dosimetry Laboratories-PSDL: π.χ. IAEA, PTB, NPL, NIST, ...).

Αντίστοιχα, ένα δευτερεύον πρότυπο είναι ένα όργανο υψηλής ακρίβειας βαθμονομημένο με άμεση (απευθείας) ιχνηλασιμότητα σε σχέση με ένα πρωτεύον πρότυπο. Τέτοια δευτερεύοντα πρότυπα τηρούνται σε υπο-πρότυπα εργαστήρια βαθμονόμησης (Secondary Standard Dosimetry Laboratories-SSDL: π.χ. EBOIA ΕΕΑΕ).

Διεθνές σύστημα μετρολογίας και δοσιμετρίας



Βαθμονόμηση θαλάμων ιονισμού

Όταν ένας θάλαμος ιονισμού αποστέλλεται για βαθμονόμηση σε ένα PSDL ή SSDL, προσδιορίζεται με ακρίβεια ο συντελεστής βαθμονόμησης του N_{D,w,Q_0} σε συνθήκες μέτρησης αναφοράς (ref) και δεδομένη ποιότητα ακτινοβολίας (Q_0).

Αν το D_{w,Q_0}^{ref} είναι γνωστό σε ένα σημείο της δέσμης Q_0 σε δεδομένες συνθήκες αναφοράς βάσει μέτρησης με πρωτεύον ή δευτερεύων πρότυπο, και στο ίδιο σημείο της ίδιας δέσμης υπό τις ίδιες συνθήκες ο θάλαμος ιονισμού δώσει ένδειξη M_{w,Q_0}^{ref} :

$$D_{w,Q_0}^{ref} = M_{w,Q_0}^{ref} \left(\frac{(\bar{W}/e)_{air} f_{Q_0} p_{ch,Q_0}}{m} \right) = M_{w,Q_0}^{ref} N_{D,w,Q_0}$$
$$\Rightarrow N_{D,w,Q_0} = \left(\frac{D_{w,Q_0}^{ref}}{M_{w,Q_0}^{ref}} \right)$$

Χρήση βαθμονομημένων θαλάμων ιονισμού: δοσιμετρία αναφοράς (reference)

Το μέγεθος ενδιαφέροντος προσδιορίζεται στις εγκαταστάσεις του χρήστη χρησιμοποιώντας ένα όργανο που έχει βαθμονομηθεί με ιχνηλασιμότητα (άμεση ή έμμεση) σε σχέση με ένα πρωτεύον πρότυπο, υπό καλώς καθορισμένες συνθήκες μέτρησης αναφοράς που προσομοιάζουν με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη βαθμονόμηση. Το μετρητικό όργανο του χρήστη καλείται ανιχνευτής αναφοράς.

Π.χ. για ένα θάλαμο ιονισμού ανοικτού τύπου όταν διαφέρουν μόνο οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας από τις συνθήκες αναφοράς:

$$D_{w,Q_0}^{ref} = M_{w,Q_0}^{user} k_{P,T} N_{D,w,Q_0} = M_{w,Q_0}^{ref} \left(\frac{D_{w,Q_0}^{ref}}{M_{w,Q_0}^{ref}} \right)$$

όπου:

$$k_{P,T} = \frac{P_{ref}}{P_{user}} \frac{T_{user}}{T_{ref}}$$

Χρήση βαθμονομημένων θαλάμων ιονισμού: σχετική (relative) δοσιμετρία

Όταν οι μετρήσεις στη δέσμη του χρήστη πραγματοποιούνται υπό συνθήκες διαφορετικές από τις συνθήκες αναφοράς, δηλαδή διαφορετικές από εκείνες για τις οποίες ισχύει αυστηρά ο συντελεστής βαθμονόμησης.

Το μέγεθος ενδιαφέροντος προσδιορίζεται τότε με τη χρήση σχετικών λόγων ή/και κατάλληλων διορθώσεων καθώς φαινόμενα που σχετίζονται με την απόκριση του ανιχνευτή αναφοράς μπορεί να επηρεάσουν την ένδειξη σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό από ό,τι επηρεάζουν την πραγματική απορροφούμενη δόση στο νερό, οδηγώντας σε αλλαγή του συντελεστή βαθμονόμησης.

Π.χ. για ένα θάλαμο ιονισμού σε Q διαφορετικό από το Q_0 :

$$D_{w,Q} = M_{w,Q} N_{D,w,Q_0} \left(\frac{N_{D,w,Q}}{N_{D,w,Q_0}} \right) = M_{w,Q_0} N_{D,w,Q_0} k_{Q,Q_0}$$

όπου:

$$k_{Q,Q_0} = \frac{N_{D,w,Q}}{N_{D,w,Q_0}} \text{ ο παράγοντας διόρθωσης ενεργειακής εξάρτησης}$$

Σχετική (relative) δοσιμετρία: παράγοντας διόρθωσης ενεργειακής εξάρτησης

Παρατηρείστε ότι:
$$N_{D,w,Q} = \frac{D_{w,Q}}{M_{w,Q}} = \frac{D_{w,Q}}{D_{det,Q}} \frac{D_{det,Q}}{M_{w,Q}} = f_Q S_{det,Q}$$

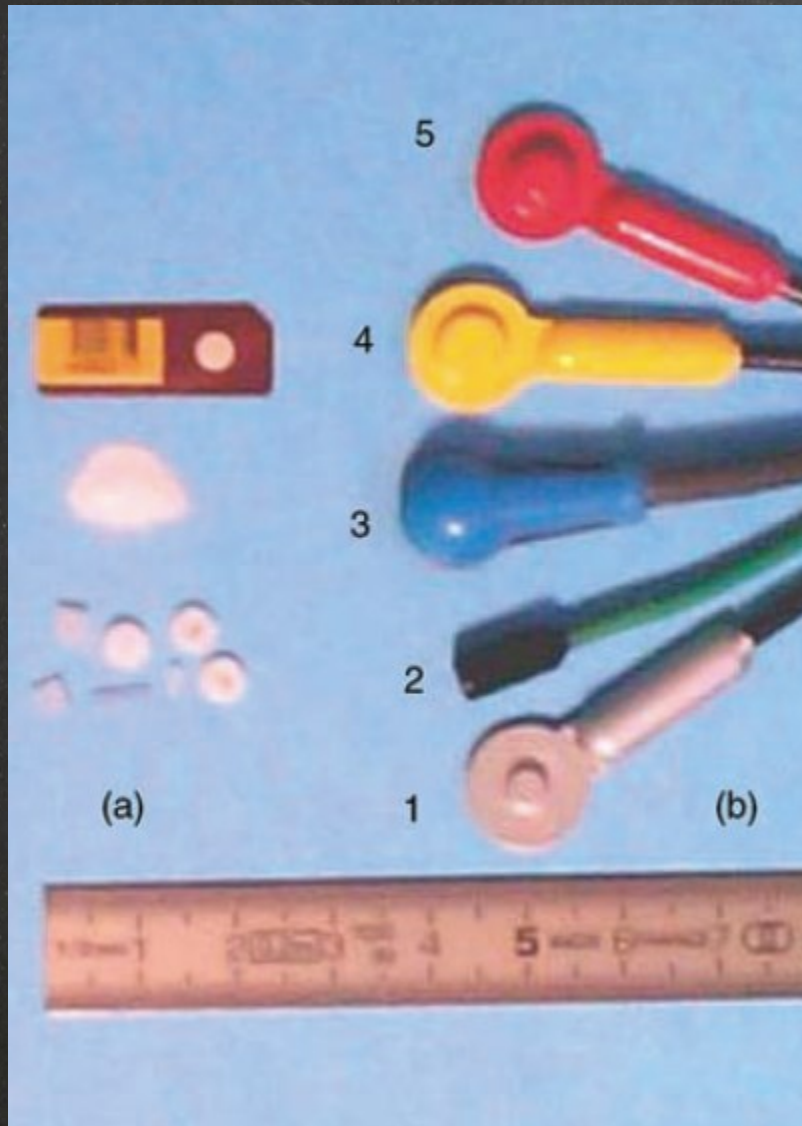
οπότε ο παράγοντας διόρθωσης ενεργειακής εξάρτησης

$$k_{Q,Q_0} = \frac{N_{D,w,Q}}{N_{D,w,Q_0}} \text{ αποτελείται από δύο παράγοντες:}$$

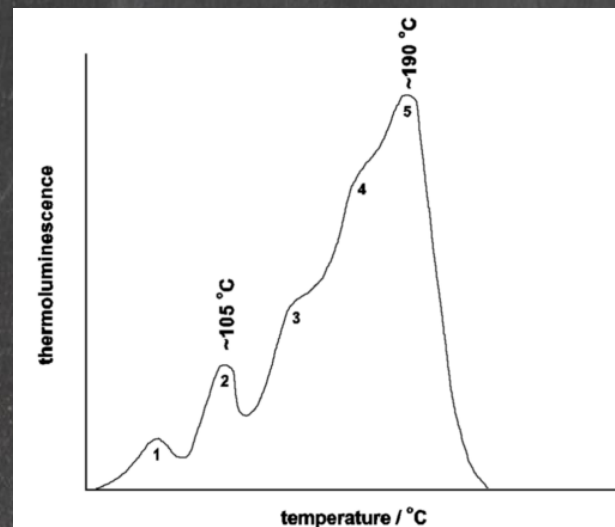
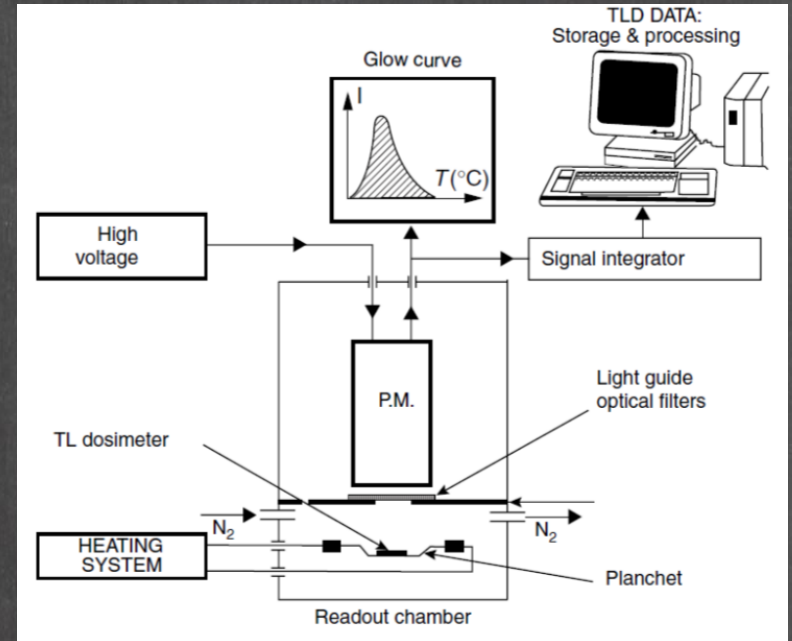
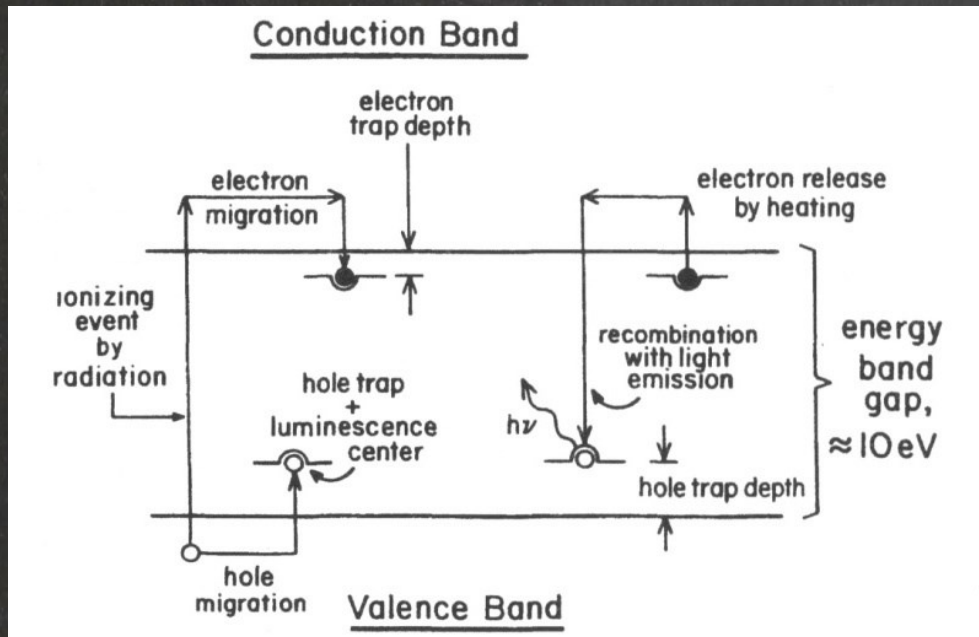
τον παράγοντα σχετικής ενεργειακής εξάρτησης λόγω υλικού $k_{m,Q,Q_0} = f_Q / f_{Q_0}$ ο οποίος μπορεί (ως λόγος δόσεων) να υπολογιστεί με Monte Carlo,

και τον παράγοντα εγγενούς σχετικής ενεργειακής εξάρτησης λόγω μεταβολής της αποδοτικότητας μετατροπής δόσης στον ανιχνευτή σε σήμα με την ενέργεια $k_{int,Q,Q_0} = S_{det,Q} / S_{det,Q_0}$ ο οποίος μπορεί να υπολογιστεί μόνο πειραματικά και (ευτυχώς!) είναι αμελητέος στην περιοχή σχετικά υψηλών ενεργειών.

Άλλα δοσιμετρικά συστήματα...;

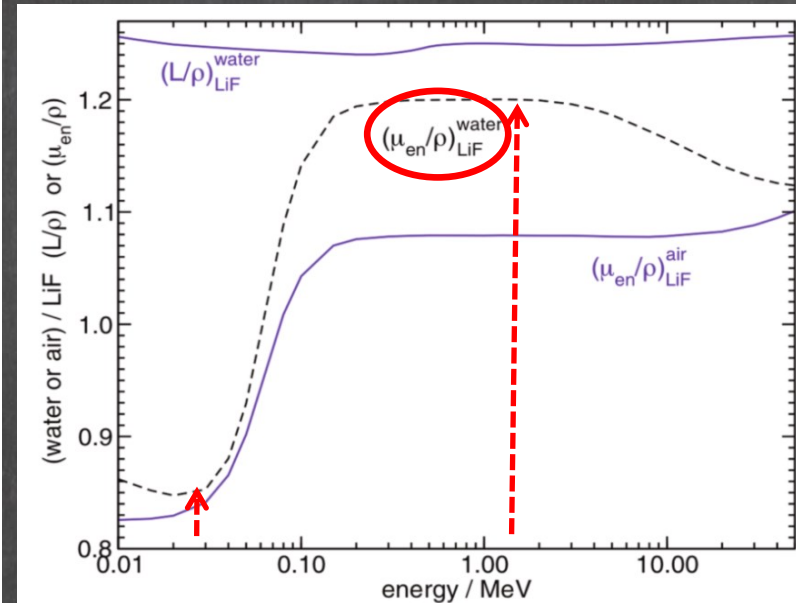


Δοσιμετρία θερμοφωταύγειας (TLD)



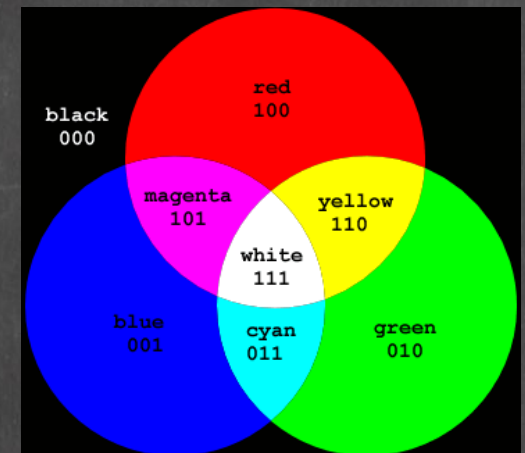
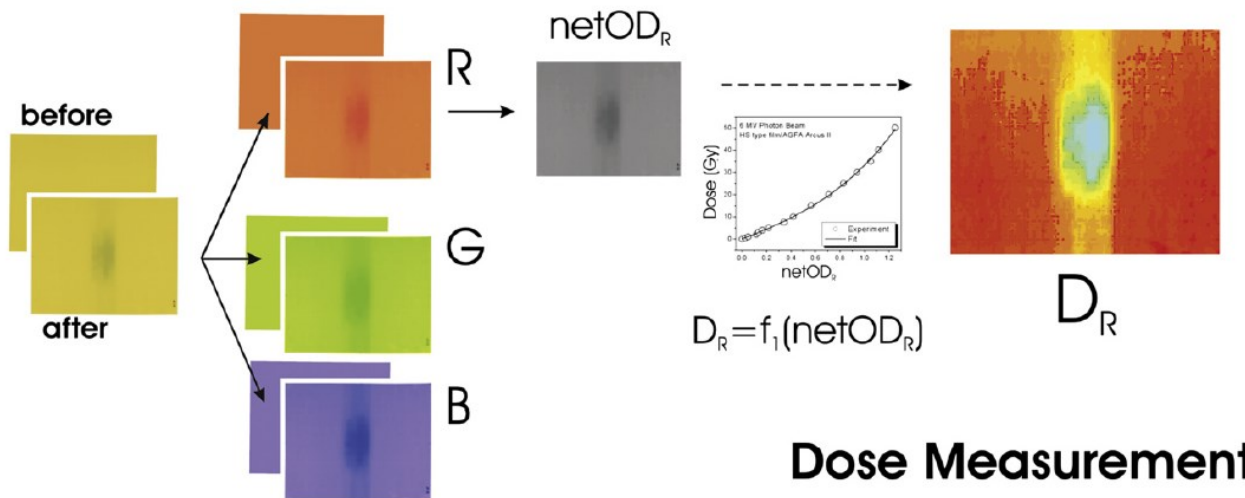
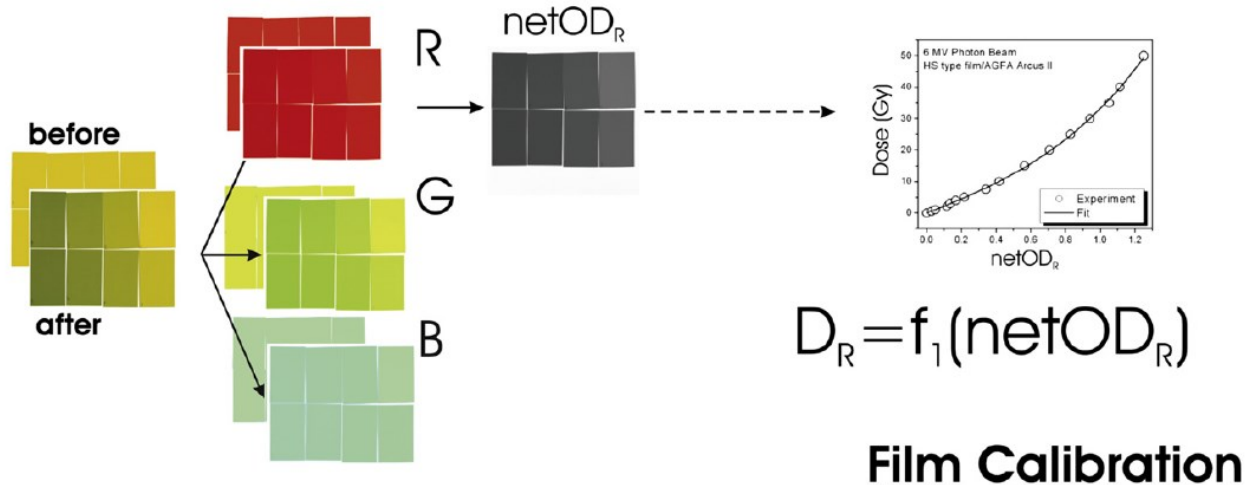
Δοσιμετρία θερμοφωταύγειας (TLD)

Material	Photoelectric Effect Z_{eff}	Compton Effect e^-/g	Density g/cm^3
Silicon (diodes) ^a	14	3×10^{23}	2.33
LiF (Mg,Ti) ^b	8.14	2.79×10^{23}	2.64
LiF (Mg,Ti,Na) ^b	8.14	2.79×10^{23}	2.64
Li ₂ B ₄ O ₇ :Mn ^b	7.4	2.92×10^{23}	2.30
Li ₂ B ₄ O ₇ :Cu ^c	7.4	2.92×10^{23}	2.30
CaSO ₄ :Mn ^b	15.3	3.02×10^{23}	2.61
CaSO ₄ :Dy ^b	15.3	3.03×10^{23}	2.61
CaF ₂ :Mn ^b	16.3	2.95×10^{23}	3.18
CaF ₂ :Dy ^b	16.3	2.95×10^{23}	3.18
Air ^d	7.64	3.03×10^{23}	1.293×10^{-3}
Water ^d	7.42	3.34×10^{23}	1.00
Fat ^d	5.92	3.48×10^{23}	0.91
Muscle ^d	7.42	3.36×10^{23}	1.04
Bone ^d	14	3×10^{23}	1.01–1.60

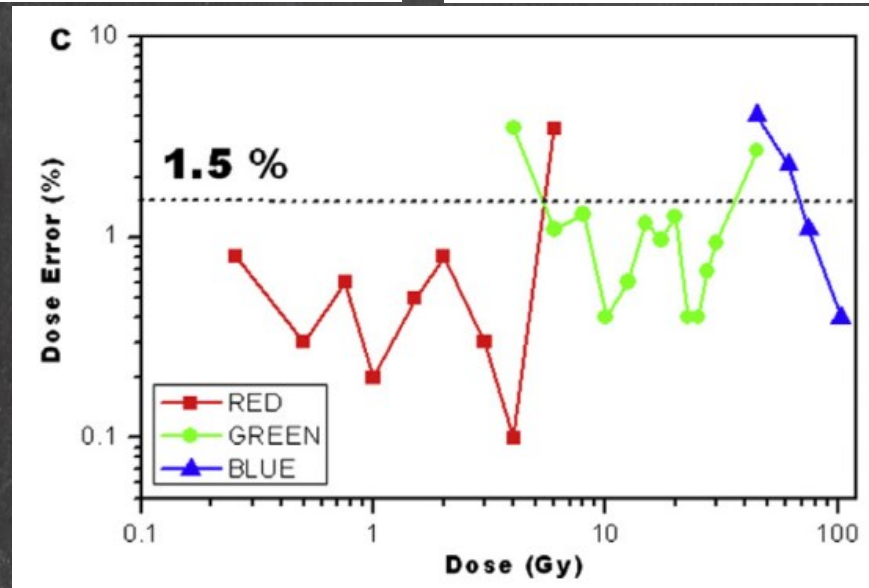
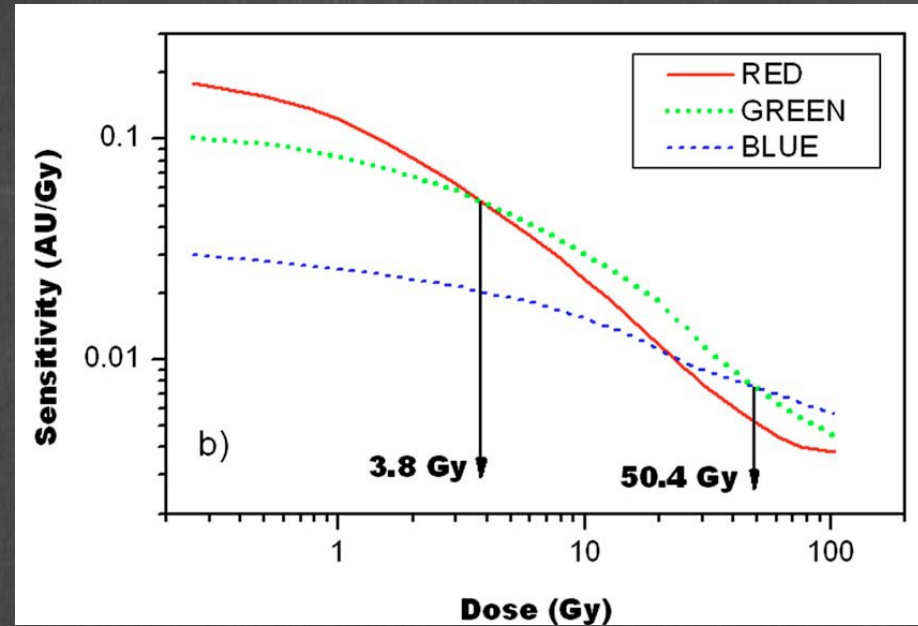
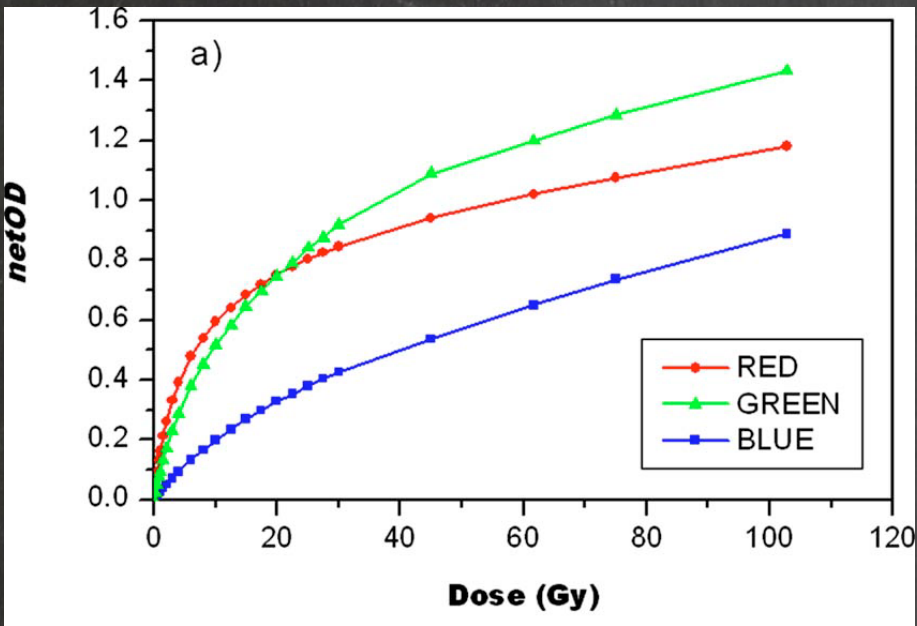


$$k_{Q,Q_0} = \frac{N_{D,W,Q}}{N_{D,W,Q_0}} = \frac{f_Q}{f_{Q_0}} \dots ?$$

Δοσιμετρία με ραδιοχρωμικά φιλμ

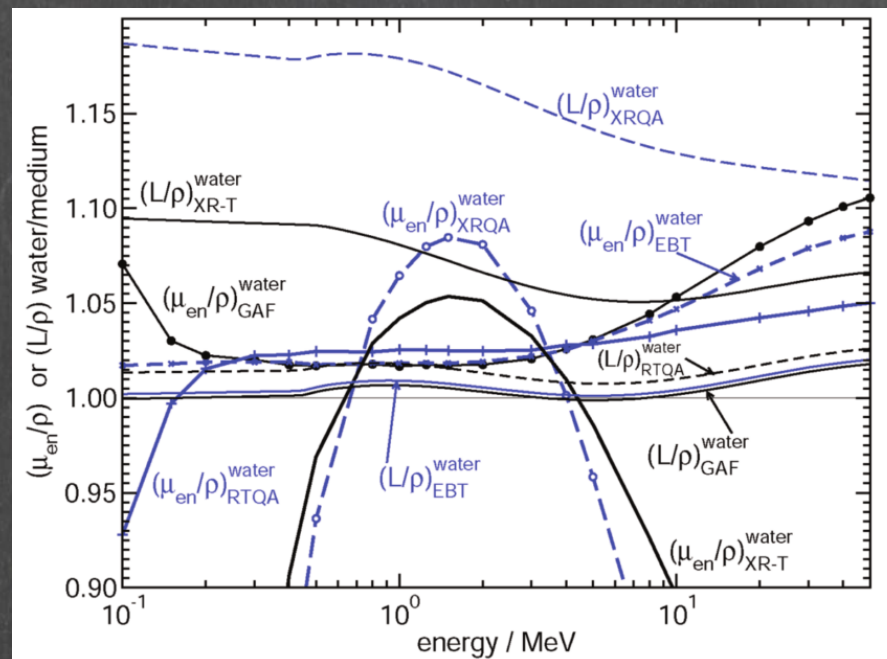


Δοσιμετρία με ραδιοχρωμικά φιλμ

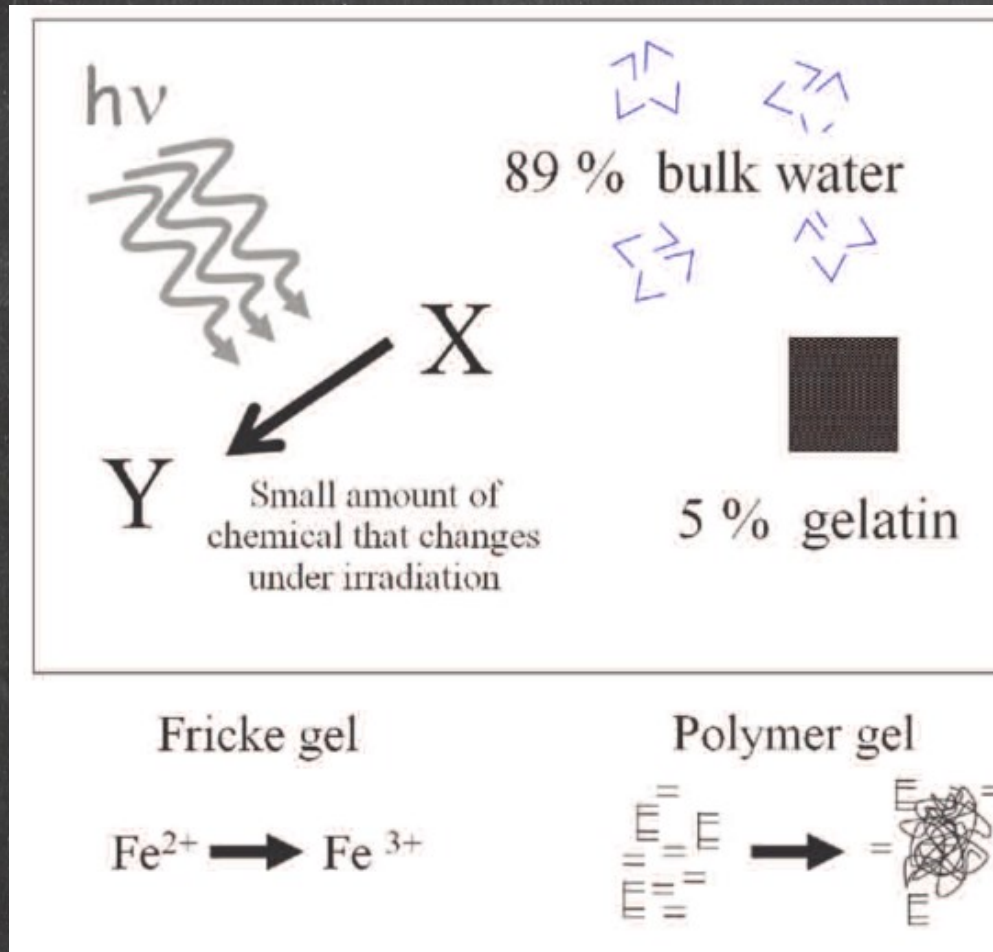


Δοσιμετρία με ραδιοχρωμικά φιλμ

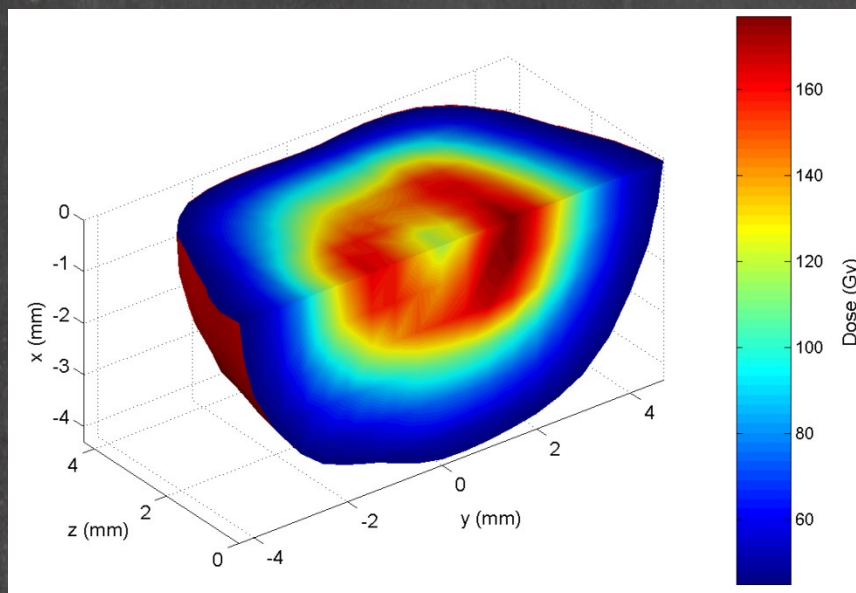
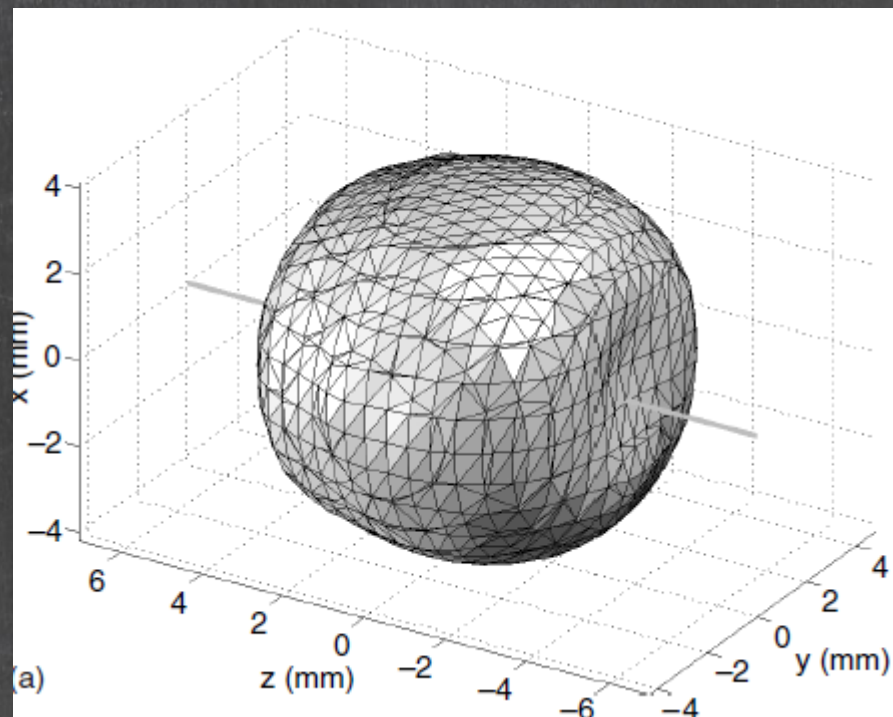
Material	Density g/cm ³	Effective Z	Number of electrons per unit volume 10 ²⁷ /m ³	Elemental composition (percentage by mass)				
				H	C	N	O	Others
GAFCHROMIC emulsion	1.08	6.27	328	9.3	56.6	15.7	18.4	
GAFCHROMIC EBT emulsion	1.1	7.05	328	9.4	57.4	13.2	16.4	0.8 Li; 2.9 Cl
GAFCHROMIC XRQA emulsion	1.2	32.6	303	6.4	38.1	5.5	13.8	0.4 Li; 13.4 Br; 22.3 Cs
GAFCHROMIC RTQA emulsion ^a	~1.1	8.29	326	9.1	53.7	12.7	14.2	1.9 Li; 8.4 Cl
GAFCHROMIC XR-T emulsion ^b	~1.2	26.6	315	7.8	46.2	11.5	14.3	7.6 Br; 12.6 Cs
Surface layer ^c	~1.2	9.90	317	6.5	32.3	21.6	20.5	2.3 Li; 16.8 Cl
Transparent and yellow polyester ^d	1.35	6.64	313	4.2	62.5		33.3	
Adhesive ^d	~1.2	6.26	329	9.4	65.6		24.9	3.5 S; 15.1 Ba
Opaque white polyester ^d	~1.6	27.6	302	3.1	46.6		31.7	
Water ^e	1.00	7.42	334	11.2			88.8	



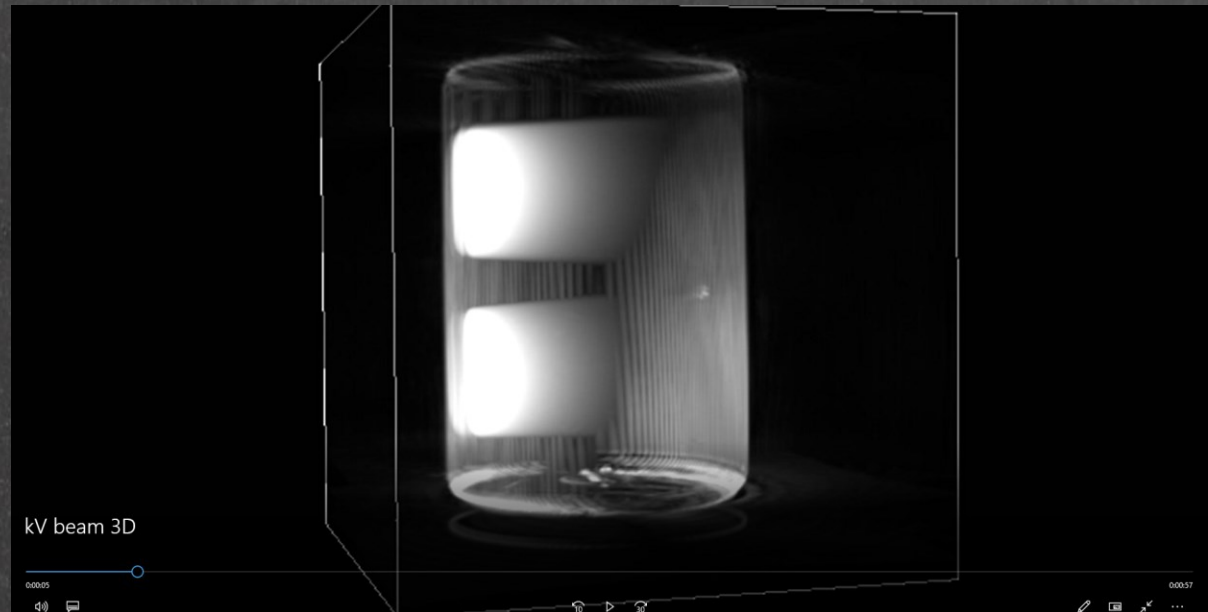
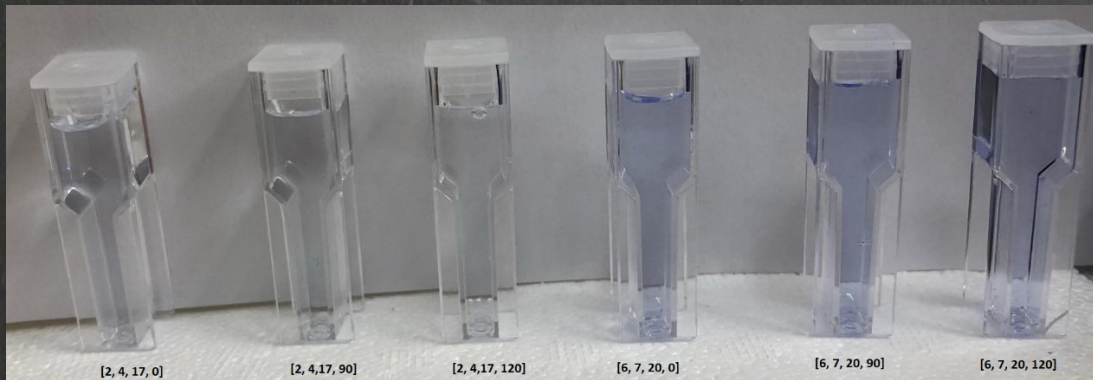
Χημική Δοσिमетρία



3D χημική δοσιμετρία πολυμερισμού



3D χημική ραδιοχρωμική δοσιμετρία



Βιβλιογραφία:

κεφ. 2-5 και 18 από το σύγγραμμά σας + σημειώσεις βιολ. επιδράσεων

Προτεινόμενα ξενόγλωσσα συγγράμματα:

- ✓ E.B. Podgorsak (Editor), Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students
(Διαθέσιμο δια-δικτυακά: www.iaea.org)
- ✓ F. H. Attix, Introduction to radiological physics & radiation dosimetry
- ✓ P. Andreo, D.T. Burns, A.E. Nahum, J. Seuntjens, F. H. Attix, Fundamentals of Ionizing Radiation Dosimetry