

Ιατρική Φυσική

Ε.Κ.Π.Α. 2024-2025

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



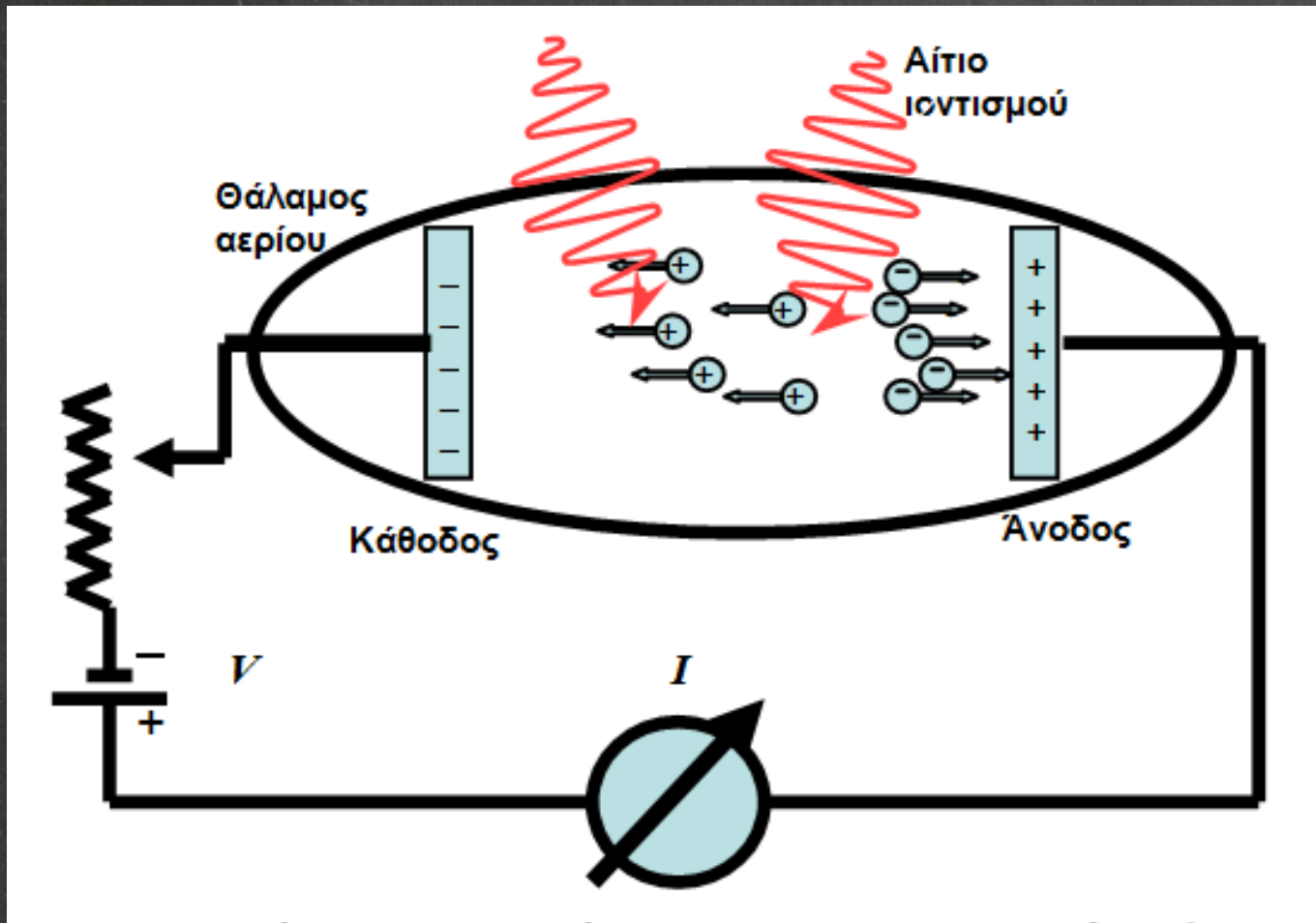
ppapagi@med.uoa.gr



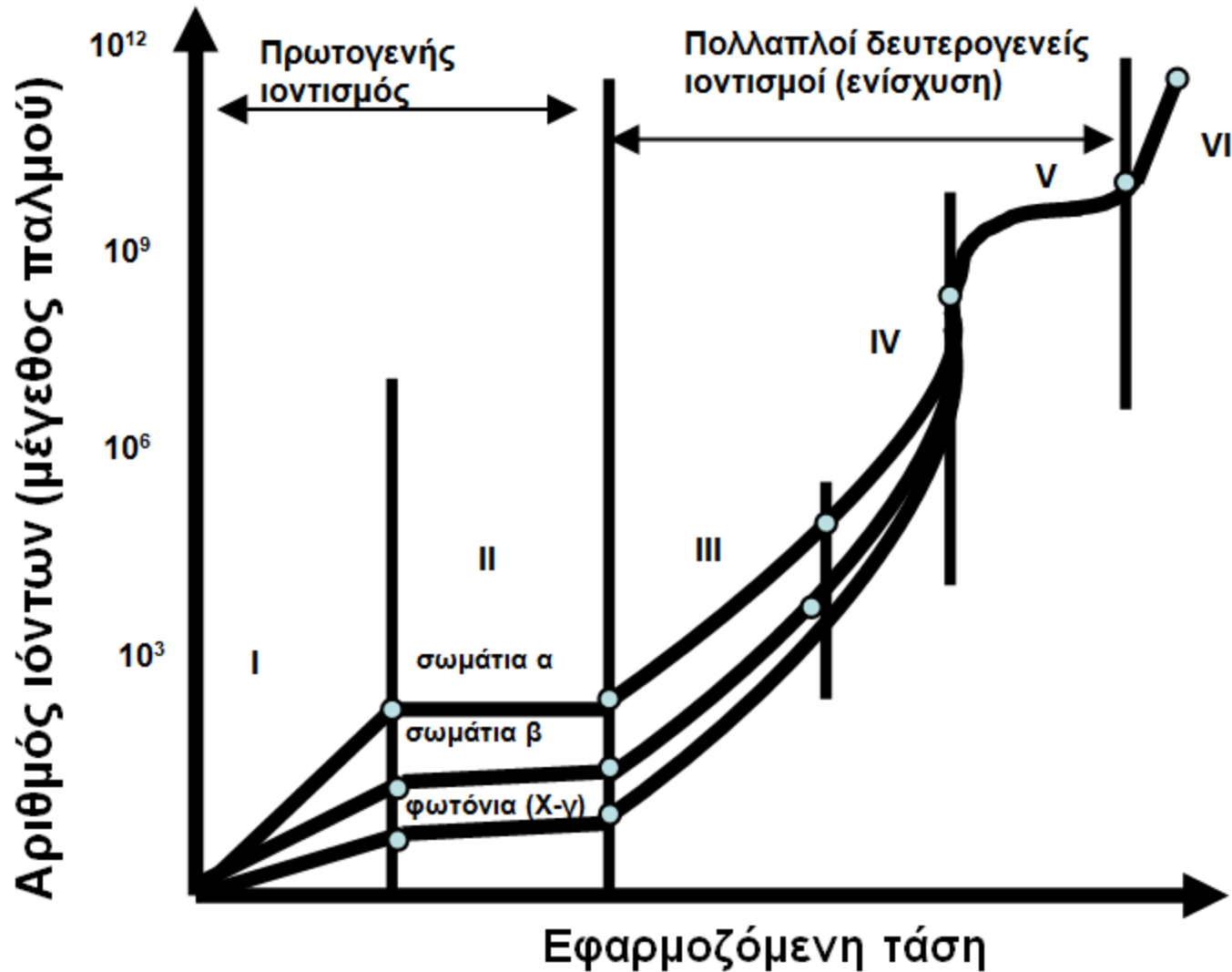
<http://mpl.med.uoa.gr/>

Πειραματική δοσιμετρία

Πειραματική δοσिमетρία: θάλαμοι ιονισμού

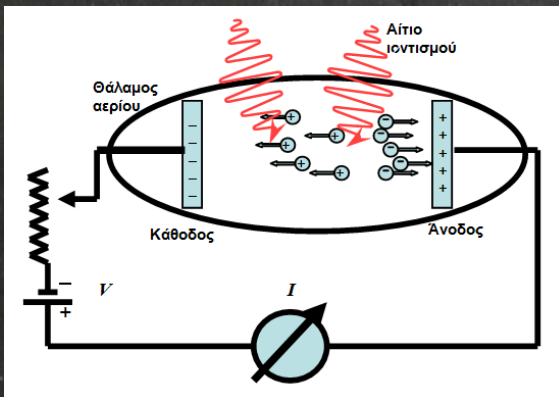


Μέγεθος παραγόμενου ηλεκτρικού παλμού σε σχέση με το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο



Πειραματική δοσिमетρία: θάλαμοι ιονισμού

- Έστω $(\bar{W}/e)_{air}$ η μέση ενέργεια που χρειάζεται για την παραγωγή ζεύγους ιόντων σε αέρα υπό δεδομένες συνθήκες.
- π.χ. $(\bar{W}/e)_{air} = 33.97 \text{ eV/ion pair} = 33.97 \text{ J/C}$
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



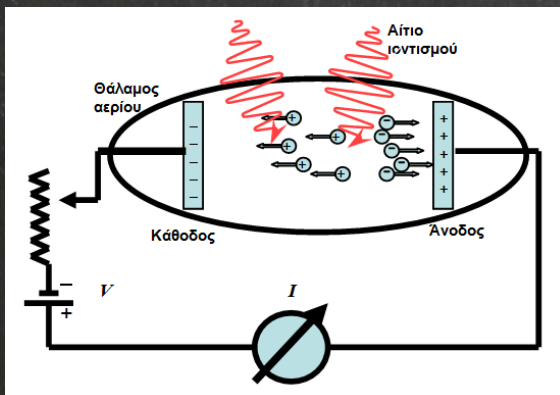
Πειραματική δοσिमетρία: θάλαμοι ιονισμού

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

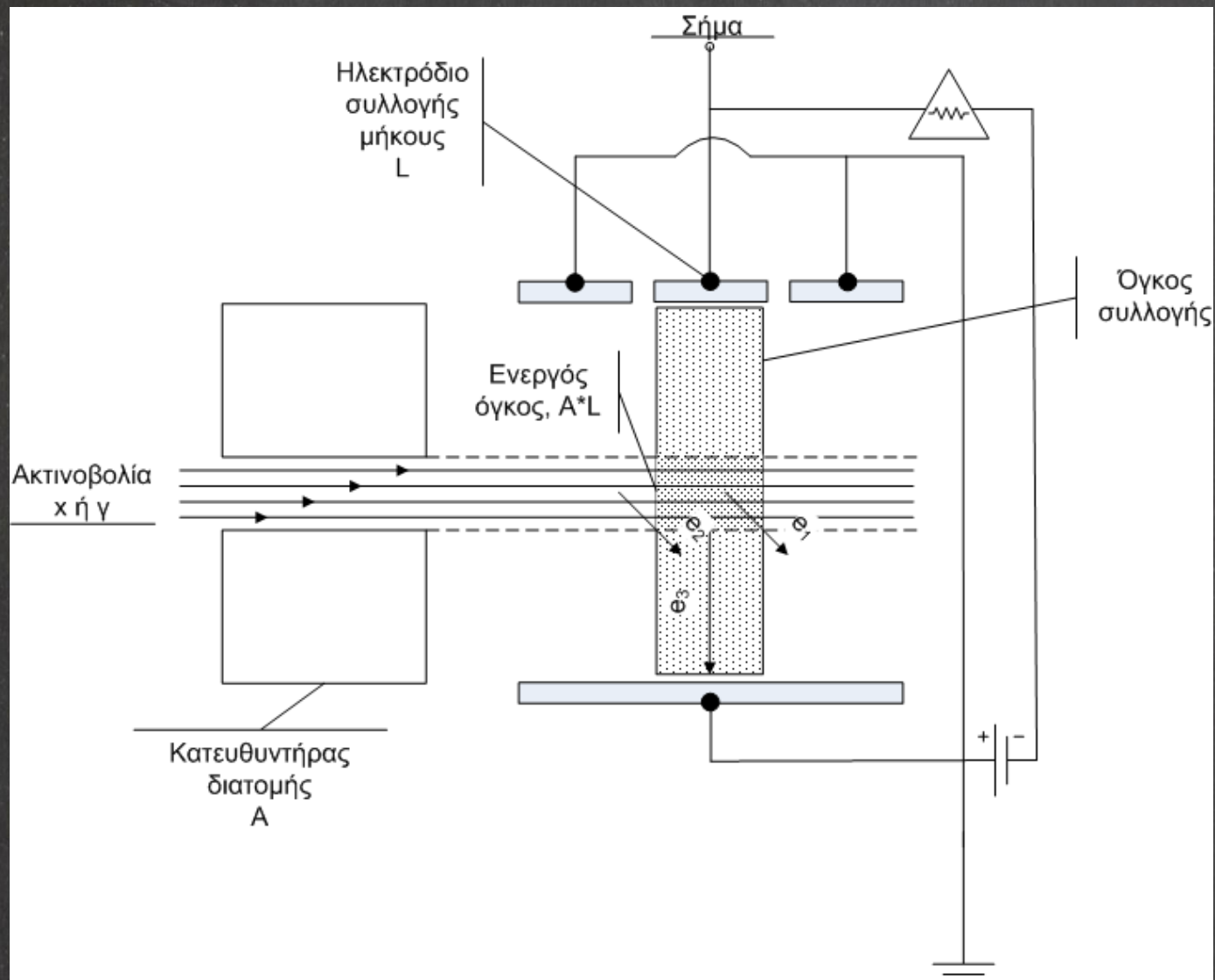
$$\frac{Q_{air}}{m} = \frac{K_{c,air}}{(\bar{W}/e)_{air}}$$

Οπότε υπό συνθήκες CPE:

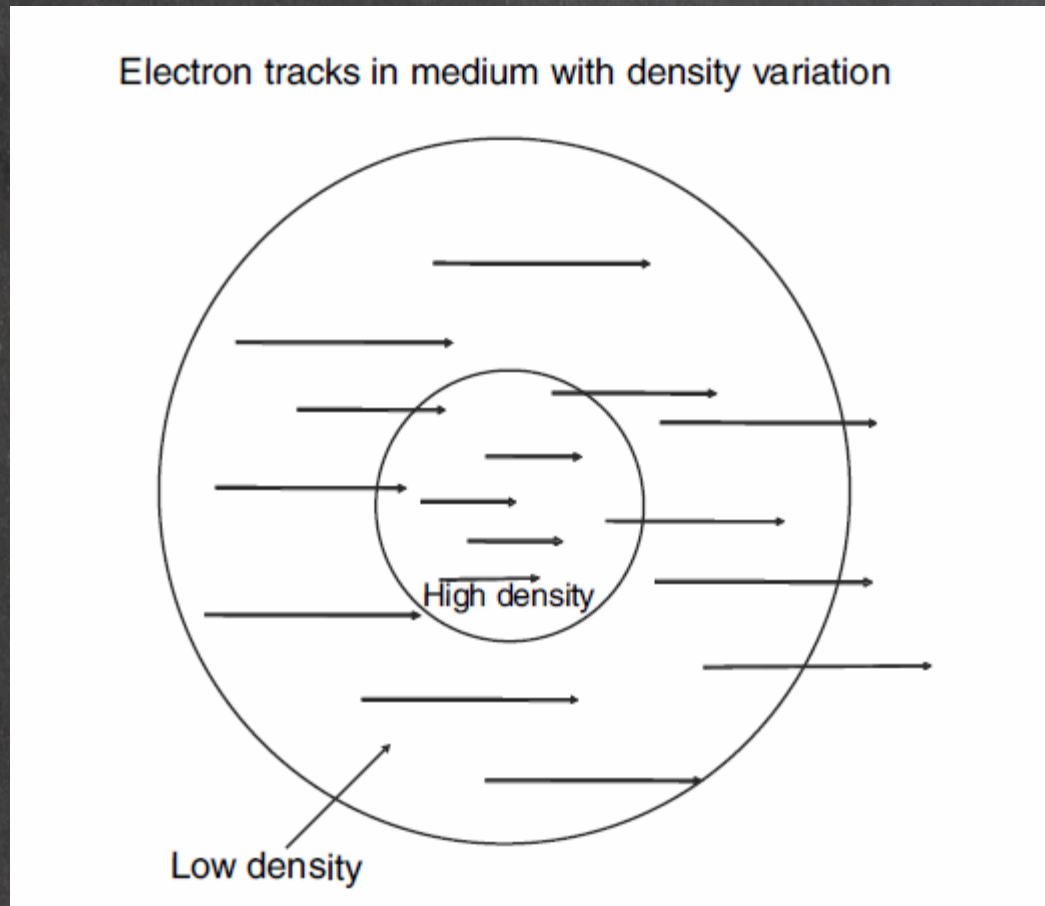
$$D = K_{c,air} = \Psi \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air} = (\bar{W}/e)_{air} \frac{Q_{air}}{m}$$



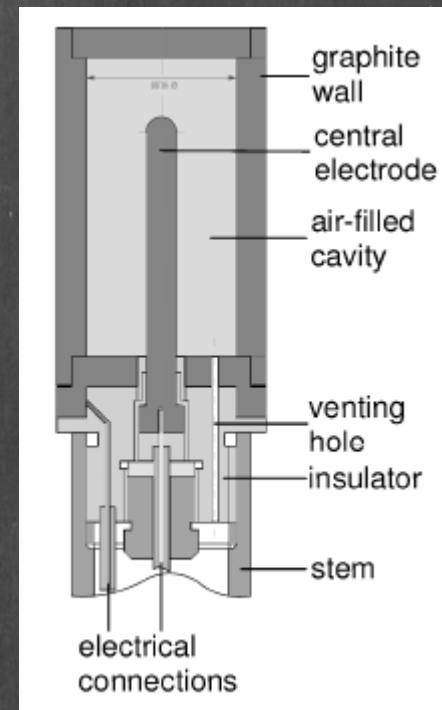
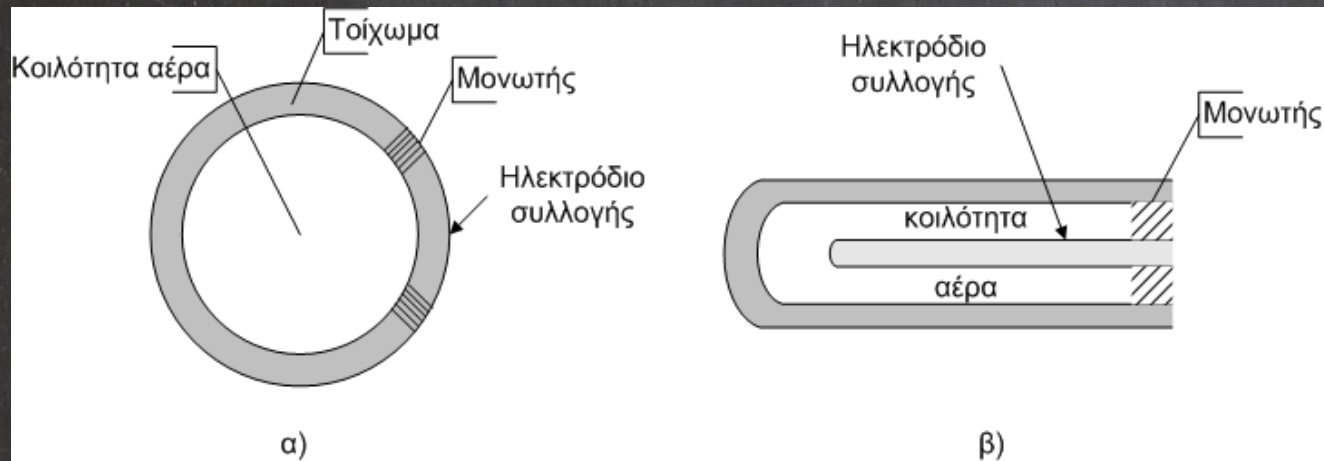
CPE και θάλαμοι ιονισμού: free air chamber



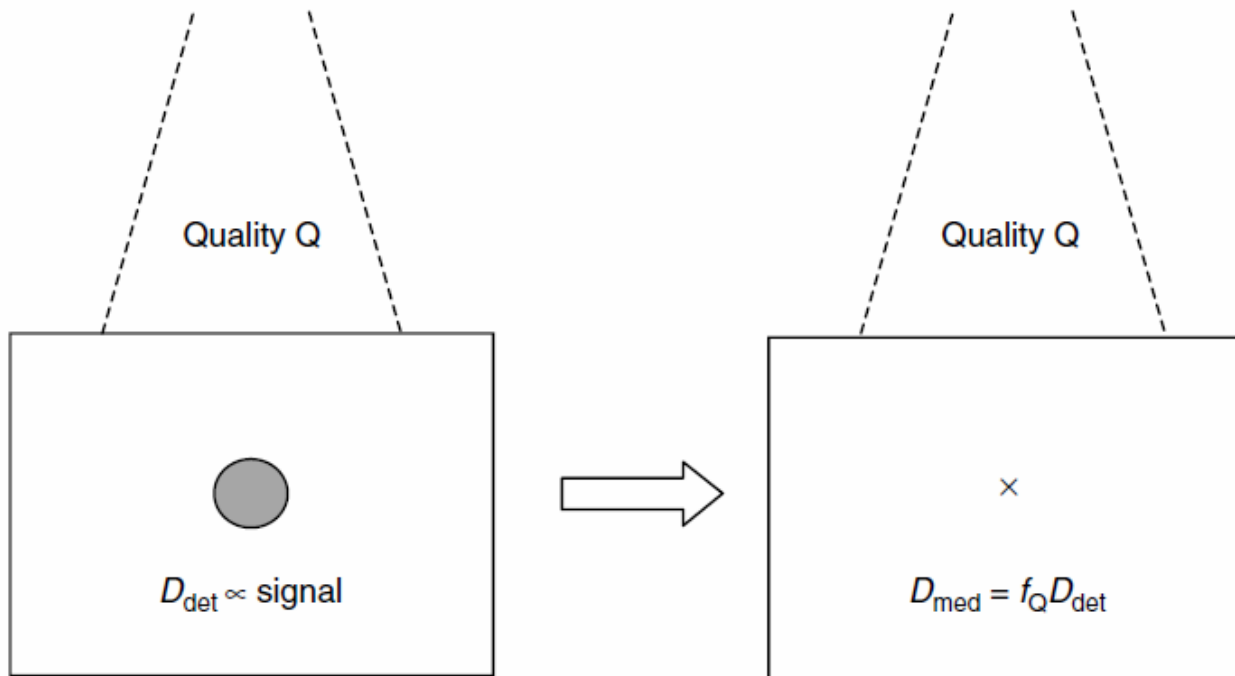
Το θεώρημα Fano:
σε μέσο δεδομένης σύστασης που εκτίθεται σε ομοιόμορφη ροή έμμεσα ιοντίζουσας ακτινοβολίας η ροή της δευτερογενούς ακτινοβολίας είναι επίσης ομοιόμορφη ανεξάρτητα από την πυκνότητα του μέσου ή διακυμάνσεων αυτής



Θάλαμοι ιονισμού τύπου κοιλότητας αερίου:



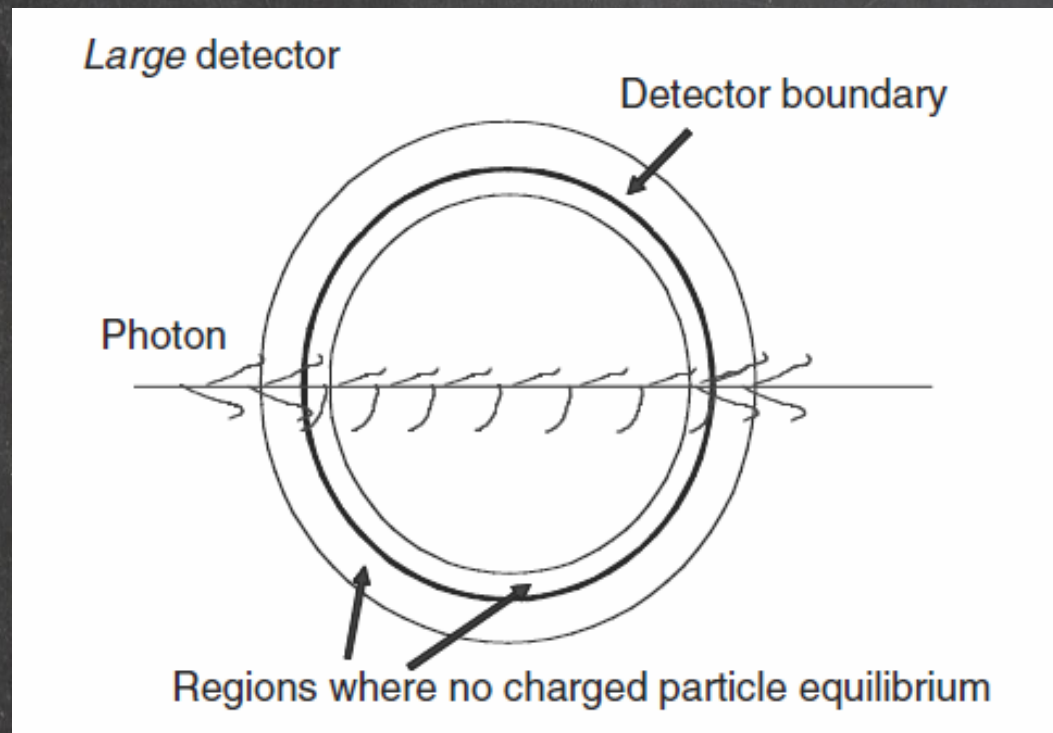
Από τη δόση στο αέριο στη δόση στο μέσο: «θεωρίες κοιλότητας»



$$f_Q = \dots ???$$

**Περίπτωση Α:
(large cavity)**

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

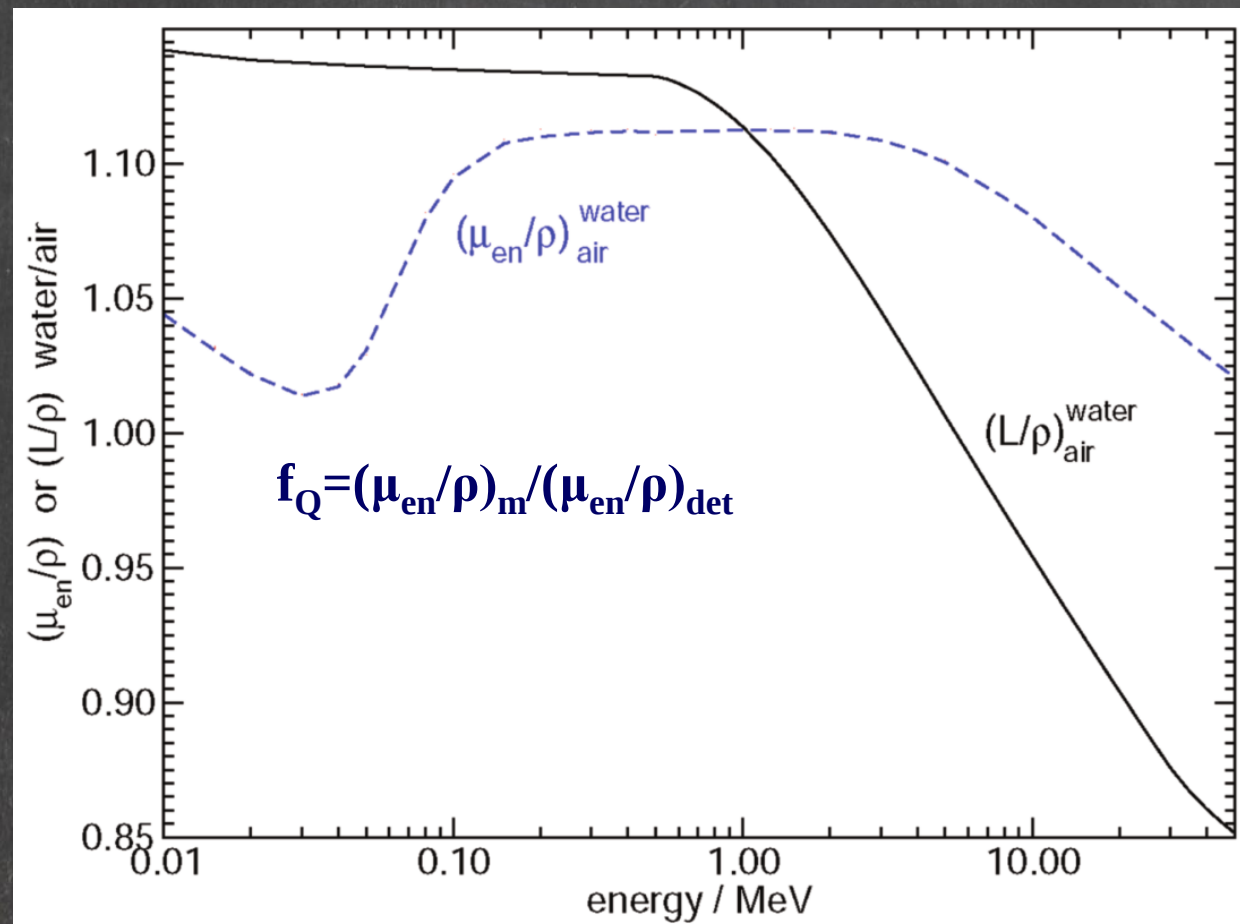


$$f_Q = (\mu_{en}/\rho)_m / (\mu_{en}/\rho)_{det}$$

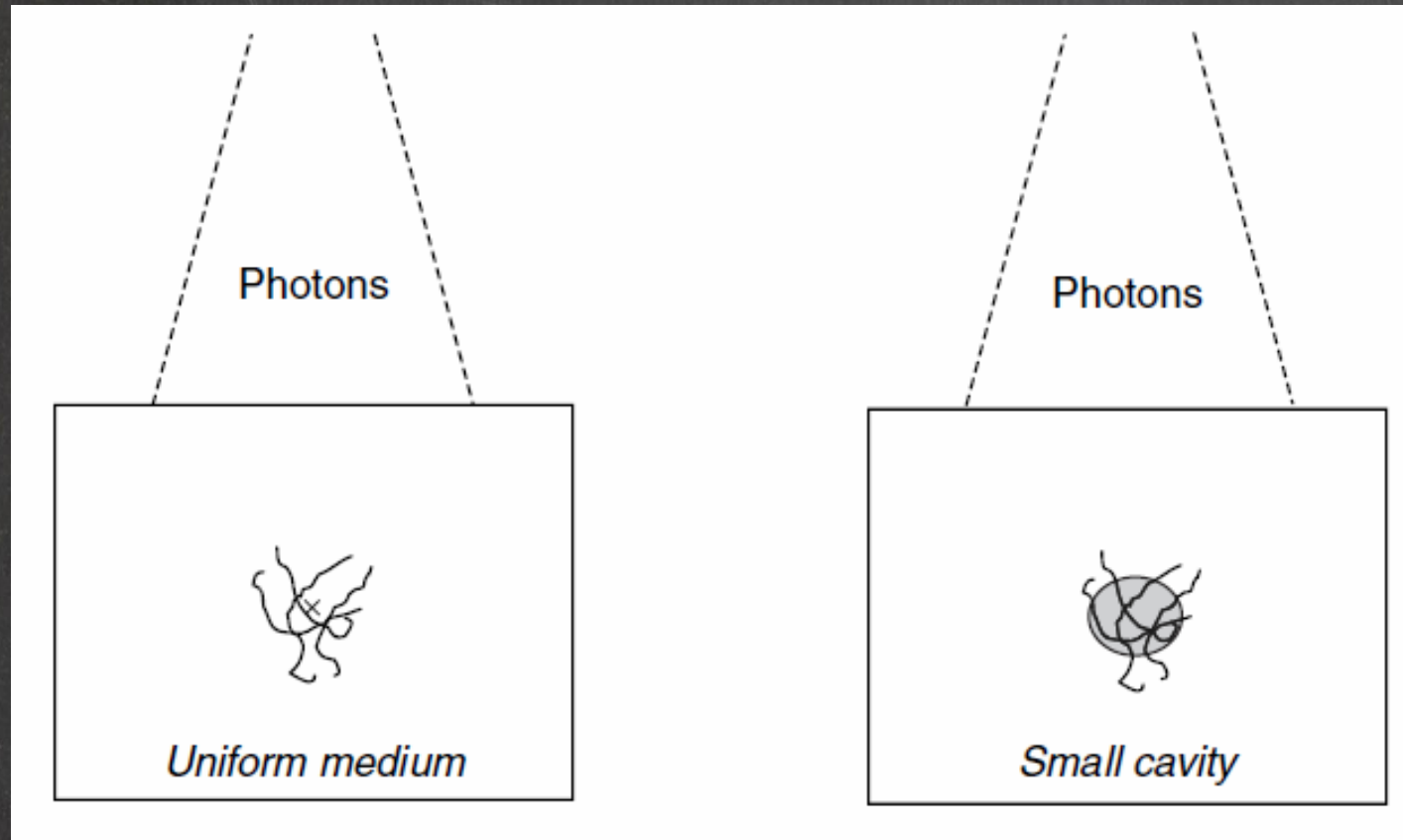
Περίπτωση Α: (large cavity)

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

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}

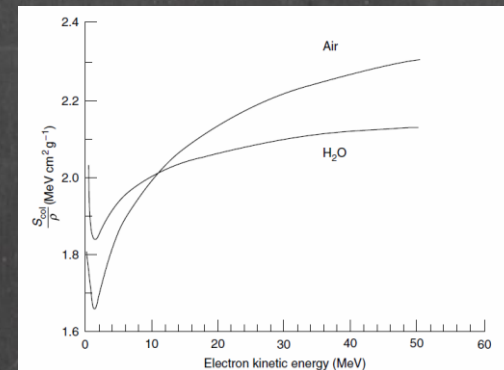
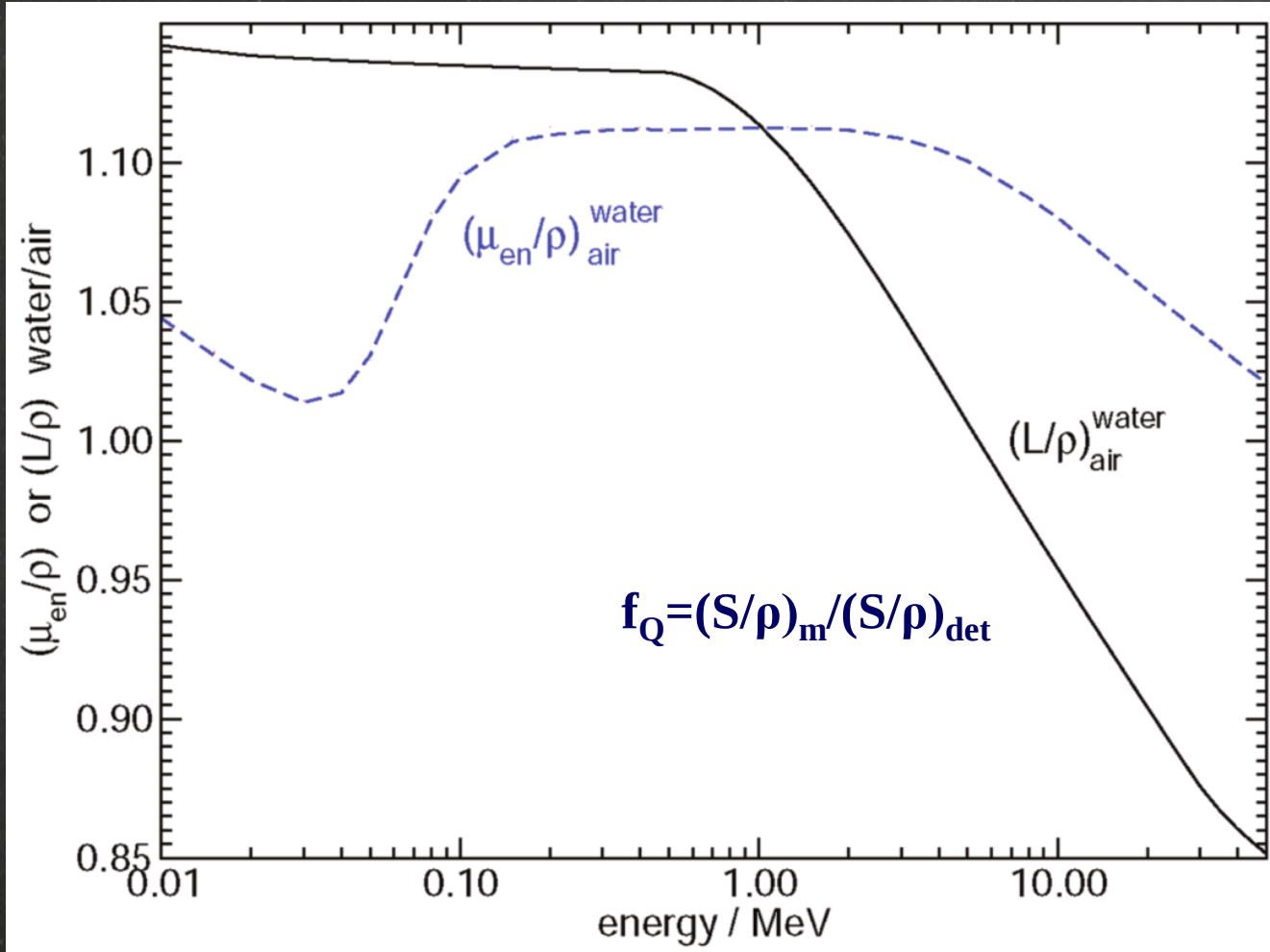


**Περίπτωση Β:
(κοιλότητα Bragg-Gray)
διάσταση κοιλότητας μικρή σε σχέση με την εμβέλεια e**



$$f_Q = (S/\rho)_m / (S/\rho)_{\text{det}}$$

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



Βαθμονόμηση θαλάμων ιονισμού

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

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

Μικρές διορθώσεις απαιτούνται για:

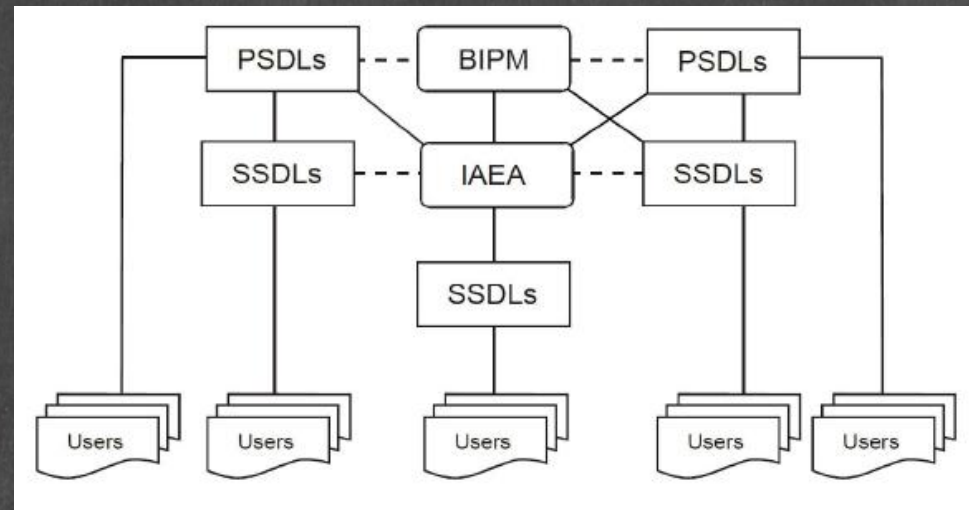
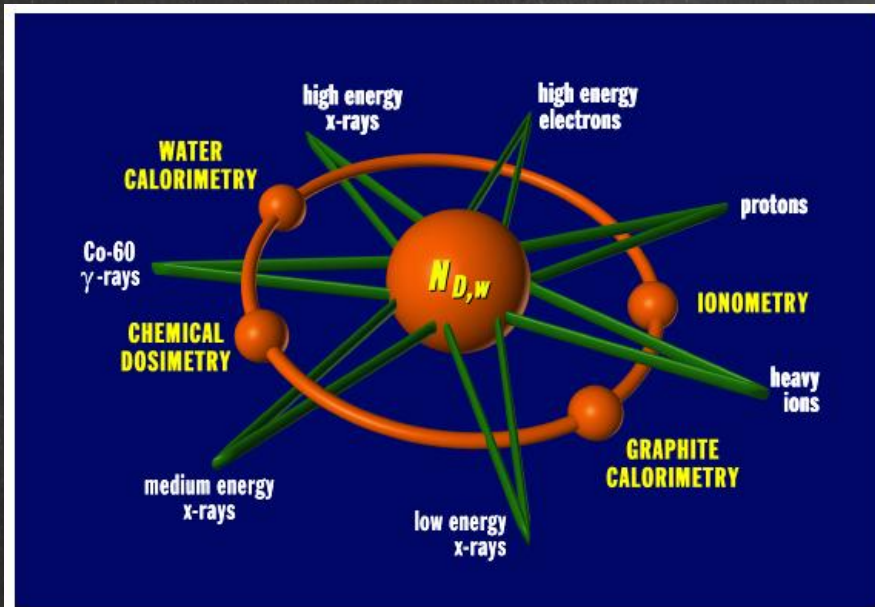
- μάζα αερίου, m
- παράγοντας διαταραχής πεδίου (perturbation factor, $p_{ch,Q}$) λόγω τοιχώματος, ηλεκτροδίου, στελέχους, και αντικατάστασης υλικού
- απόδοση συλλογής φορτίου
- density (polarization effect)
- ...

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

Βαθμονόμηση θαλάμων ιονισμού

$$D_{w,Q_0}^{ref} = M_{w,Q_0}^{ref} \frac{f_{Q_0} \frac{W}{e} p_{ch,Q_0}}{m} = M_{w,Q_0}^{ref} N_{D,w,Q_0}$$

Όπου ο δείκτης ref υποδηλώνει συνθήκες αναφοράς (ποιότητα δέσμης, βάθος, πίεση, θερμοκρασία) και N_{D,w,Q_0} ο συντελεστής βαθμονόμησης



Βαθμονόμηση θαλάμων ιονισμού

Για μετρήσεις σε συνθήκες διαφορετικές από τις συνθήκες αναφοράς:

$$D_{w,Q} = M_{w,Q} k_{P,T} N_{D,w,Q_0} k_{Q,Q_0}$$

όπου:

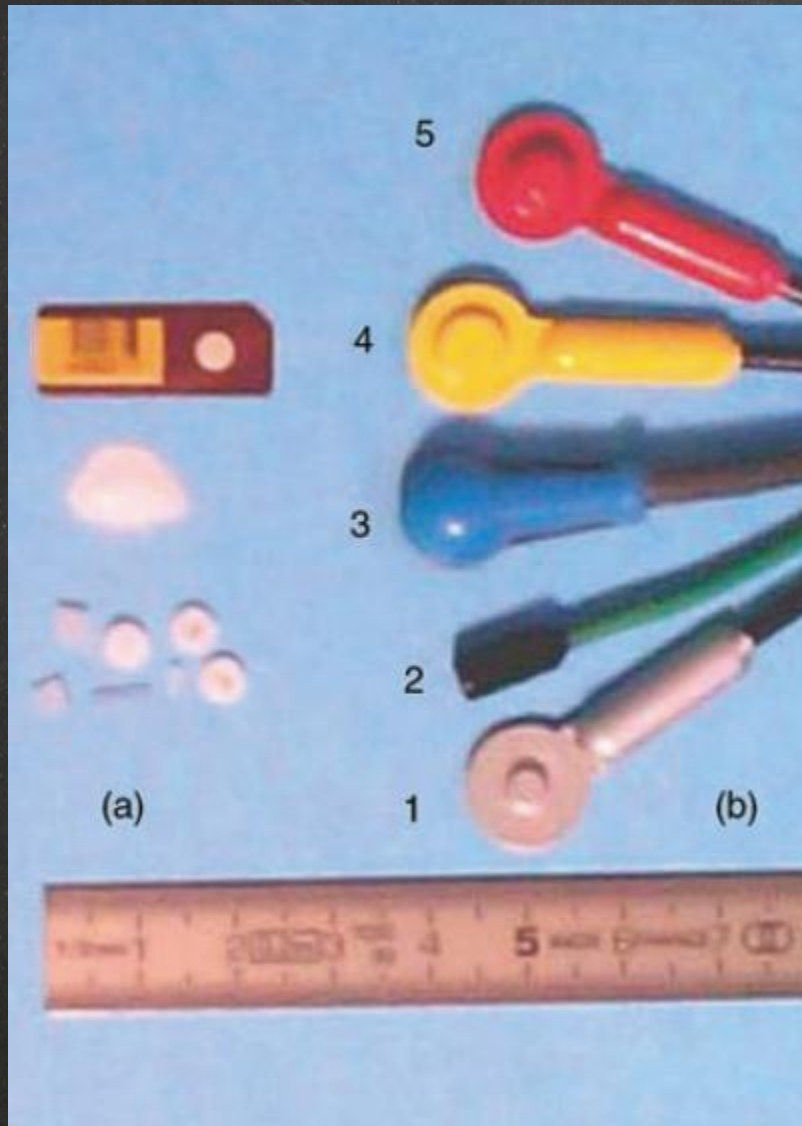
$$k_{P,T} = \frac{P_{ref}}{P} \frac{T}{T_{ref}}$$

(υπολογίζεται βάσει συνθηκών μέτρησης)

$$k_{Q,Q_0} = \frac{N_{D,w,Q}}{N_{D,w,Q_0}} = \frac{f_Q p_{ch,Q}}{f_{Q_0} p_{ch,Q_0}}$$

(υπολογίζεται με προσομοίωση MC ή προσδιορίζεται πειραματικά)

Άλλα δοσιμετρικά συστήματα...;



Γενικά χαρακτηριστικά δοσιμετρικών συστημάτων

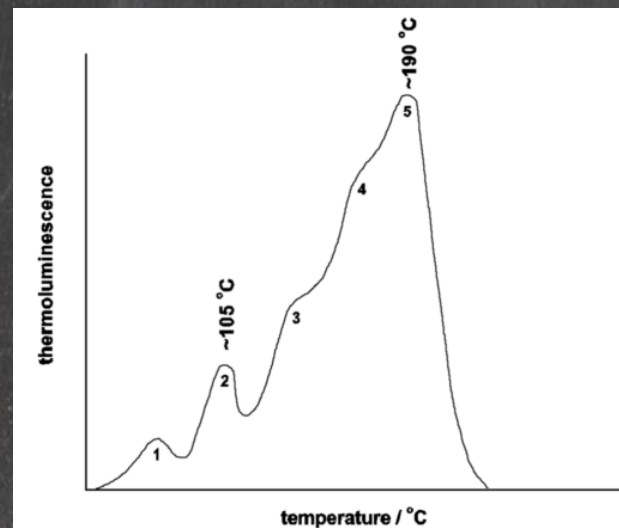
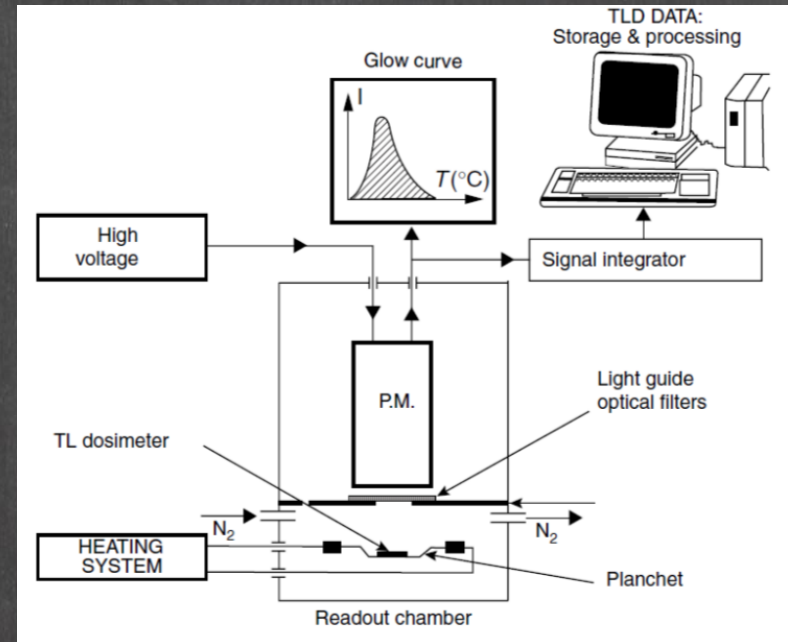
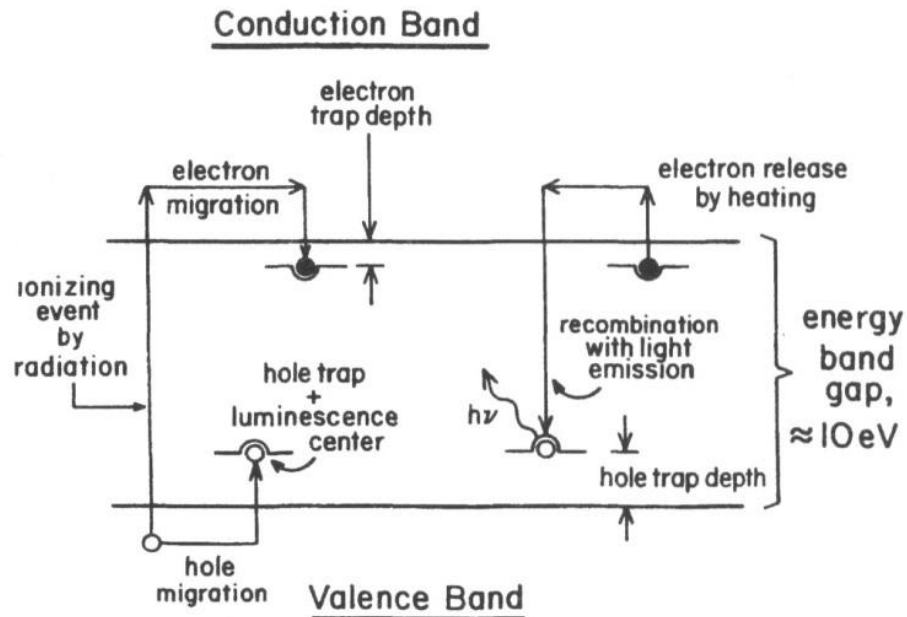
■ Οποιοδήποτε σύστημα παράγει μετρήσιμο σήμα που συναρτάται της δόσης ιοντίζουσας ακτινοβολίας που απορρόφησε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δοσίμετρο.

Επειδή όμως ο λόγος $\frac{D_{air,Q}}{M_{w,Q}}$ δεν είναι γνωστός όπως στους θαλάμους ιονισμού ($\frac{W}{e}$) και άλλα δοσίμετρα που καλούνται **απόλυτα δοσίμετρα** (καλορίμετρα, Fricke, alanine) χρειάζονται βαθμονόμηση ανεξάρτητα από την απαιτούμενη ακρίβεια και καλούνται **σχετικά δοσίμετρα**.

Επιθυμητά χαρακτηριστικά (σχετικών) δοσιμέτρων

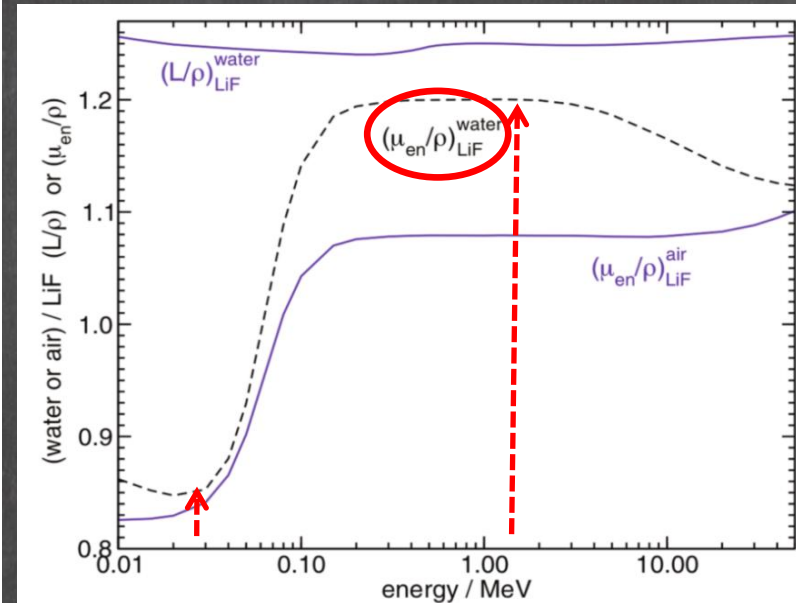
- (1) Ευαισθησία: αρκετά υψηλή για μέτρηση χαμηλών ρυθμών δόσης. Αν είναι πολύ υψηλή θα προκληθεί κορεσμός σε αυξημένο ρυθμό δόσης
- (2) Επαρκές εύρος μετρούμενων δόσεων και (κατά προτίμηση) γραμμικότητα απόκρισης συναρτήσει δόσης
- (3) Ανεξαρτησία απόκρισης από παράγοντες όπως ρυθμός δόσης, T , P , 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

Δοσιμετρία θερμοφωταύγειας (TLD)



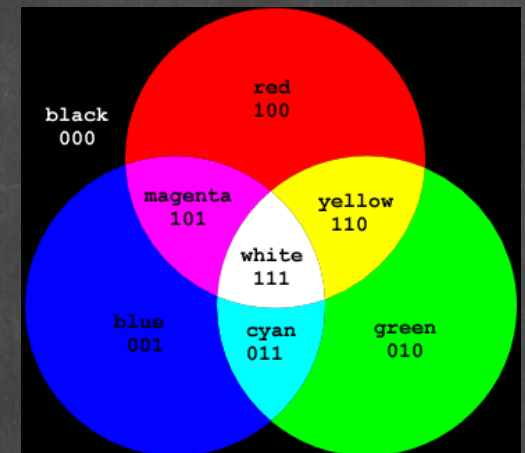
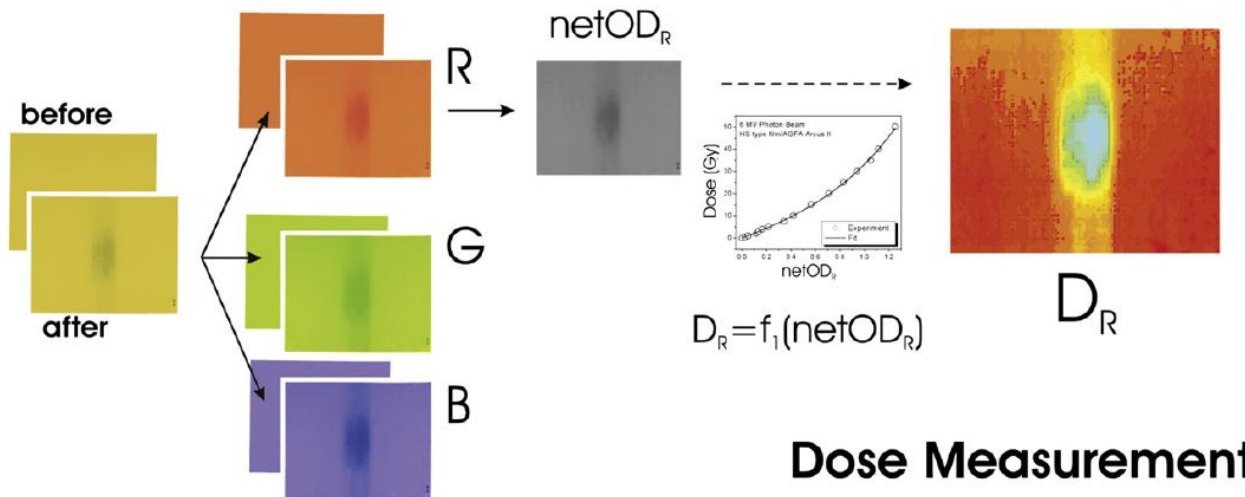
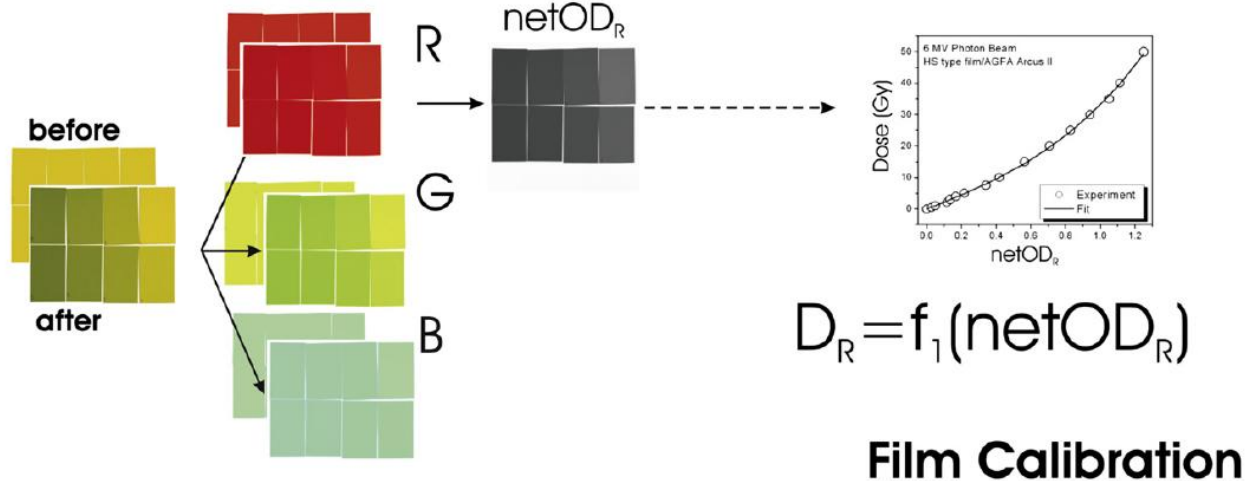
Δοσιμετρία θερμοφωταύγειας (TLD)

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

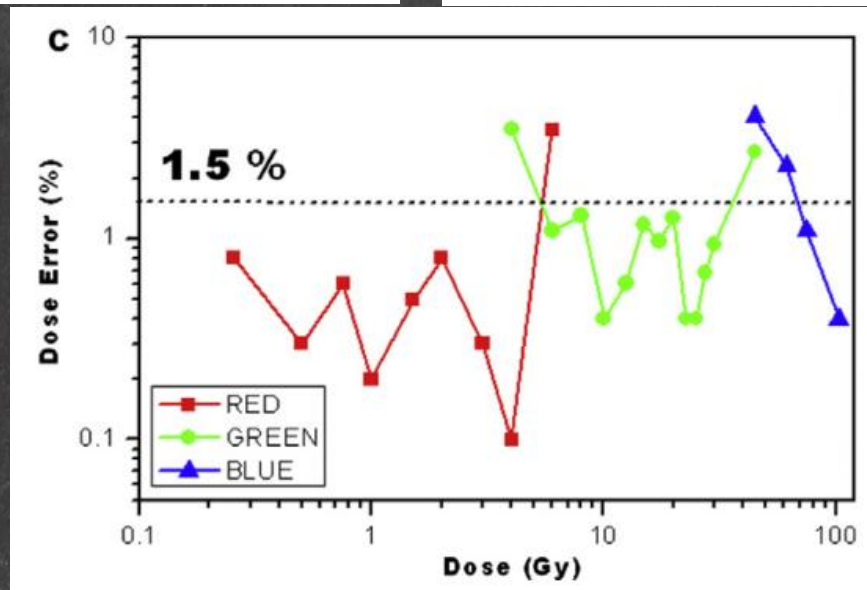
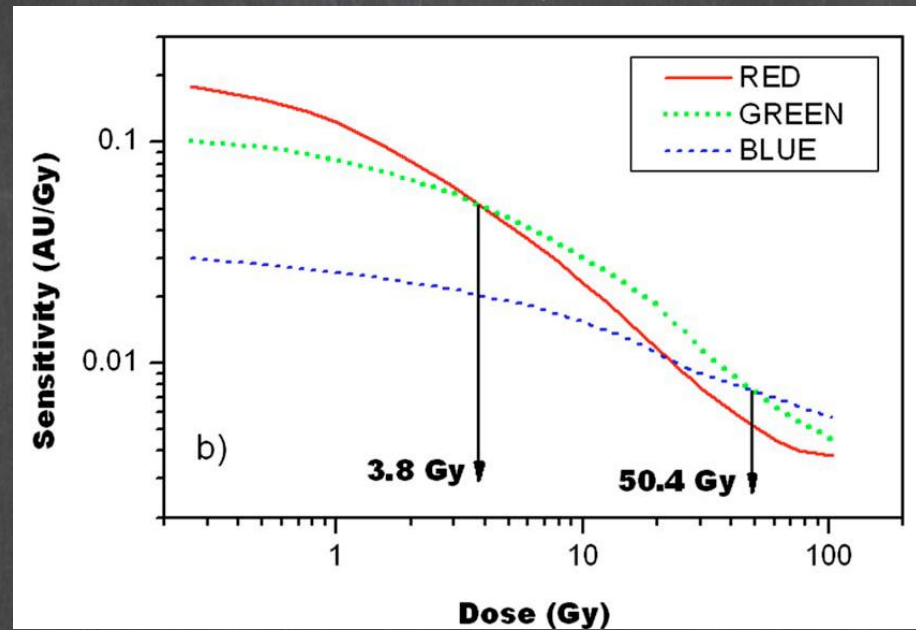
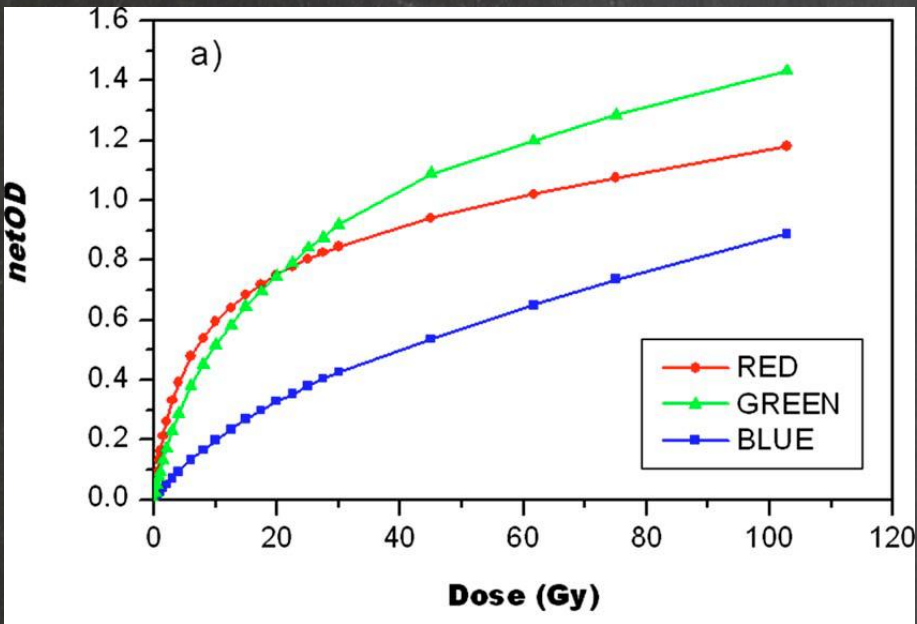


$$k_{Q,Q_0} = \frac{N_{D,W,Q}}{N_{D,W,Q_0}} = \frac{f_Q}{f_{Q_0}} \dots ?$$

Δοσιμετρία με ραδιοχρωμικά φιλμ

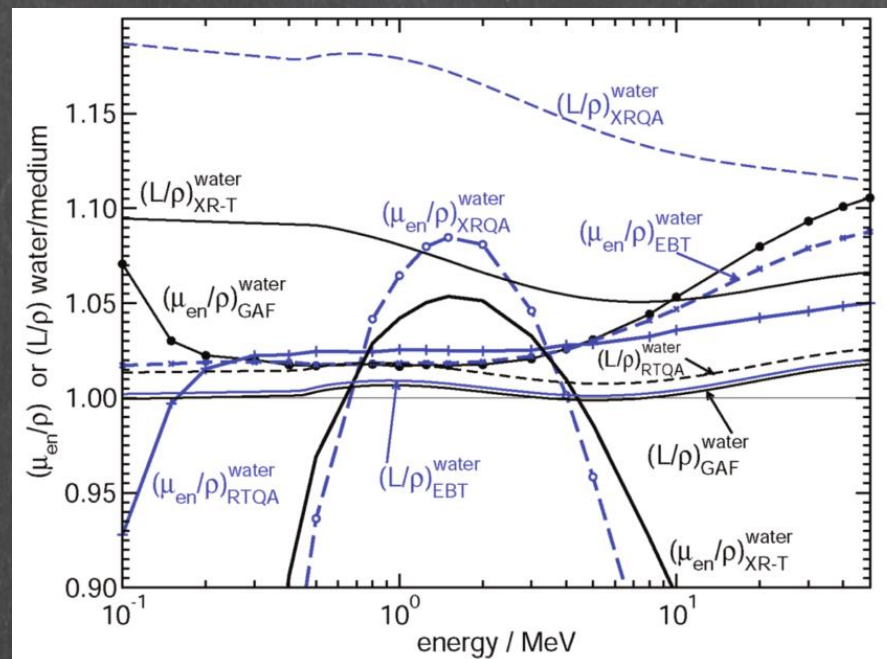


Δοσιμετρία με ραδιοχρωμικά φιλμ

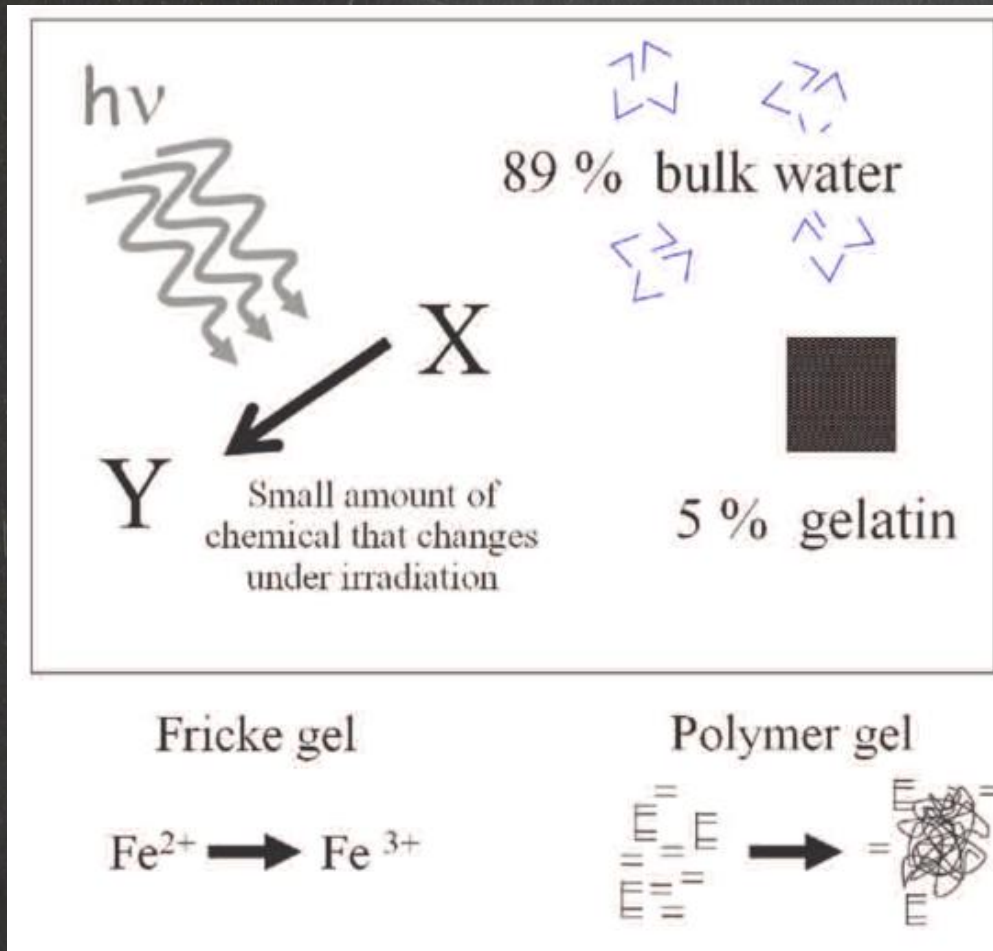


Δοσιμετρία με ραδιοχρωμικά φιλμ

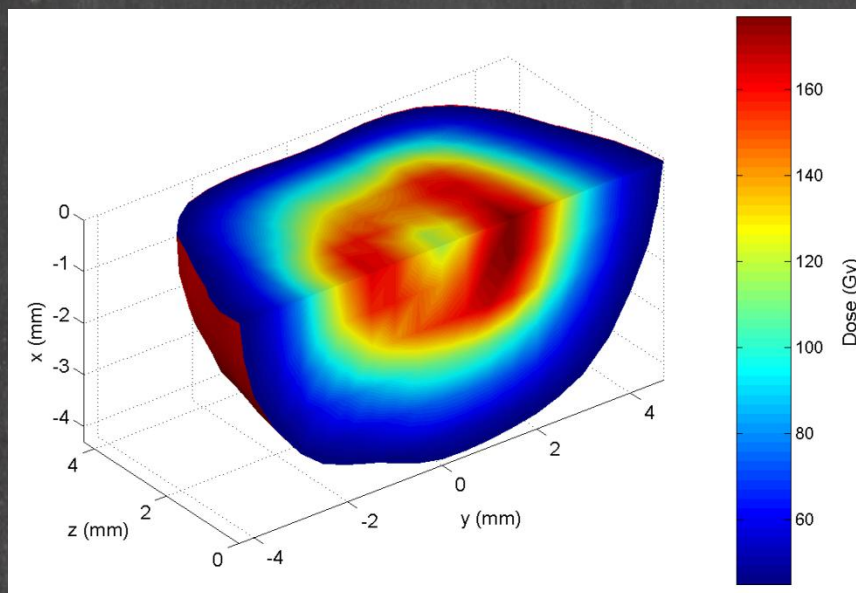
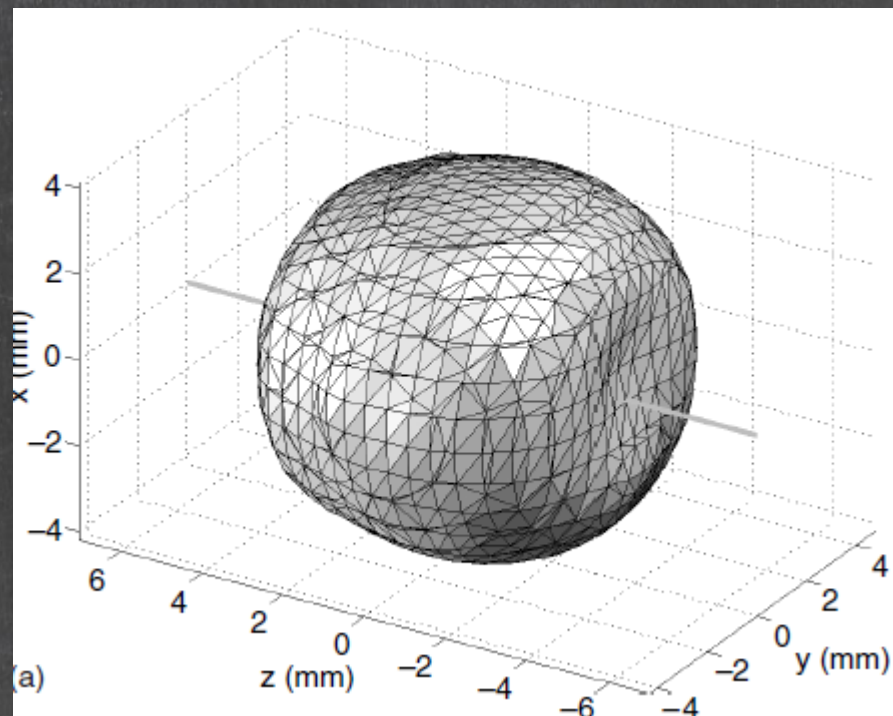
Material	Density g/cm ³	Effective Z	Number of electrons per unit volume 10 ²⁷ /m ³	Elemental composition (percentage by mass)				
				H	C	N	O	Others
GAFCHROMIC emulsion	1.08	6.27	328	9.3	56.6	15.7	18.4	
GAFCHROMIC EBT emulsion	1.1	7.05	328	9.4	57.4	13.2	16.4	0.8 Li; 2.9 Cl
GAFCHROMIC XRQA emulsion	1.2	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 ^c	1.00	7.42	334	11.2			88.8	



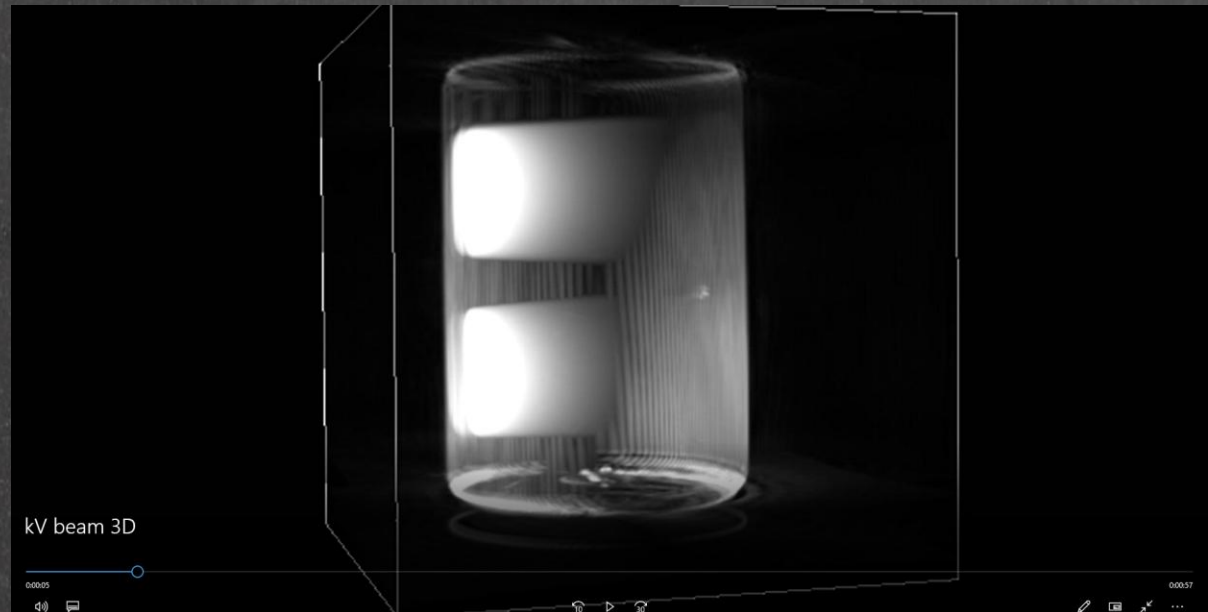
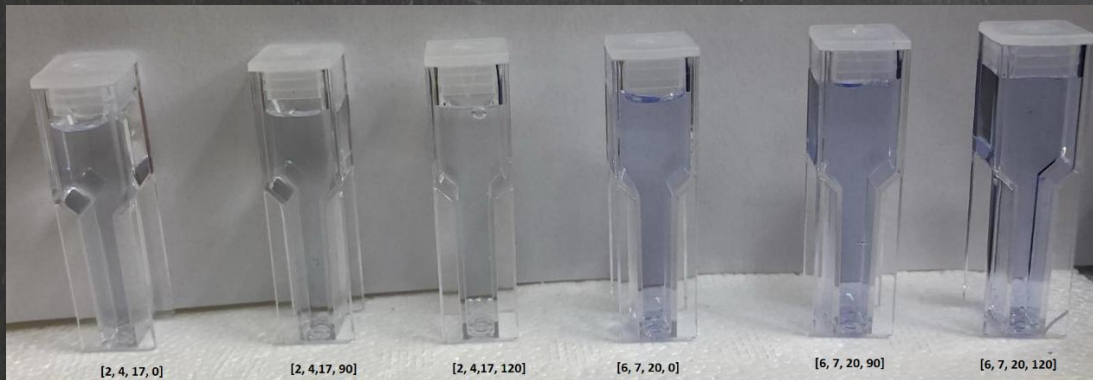
Χημική Δοσिमетρία



3D χημική δοσιμετρία πολυμερισμού



3D χημική ραδιοχρωμική δοσιμετρία



Βιβλιογραφία:

κεφ. 2-5 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