

# **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/>

**Έμμεσα ιοντίζουσα ακτινοβολία:**

**Σημειακό-ισοτροπικό μοντέλο ...**

Μπορούμε να υπολογίσουμε το ρυθμό δόσης σε απόσταση  $x$  από σημειακή πηγή γνωστής ενεργότητας, εντός ομοιογενούς μέσου απείρων διαστάσεων, δεδομένων των συντελεστών αλληλεπίδρασης ... ;



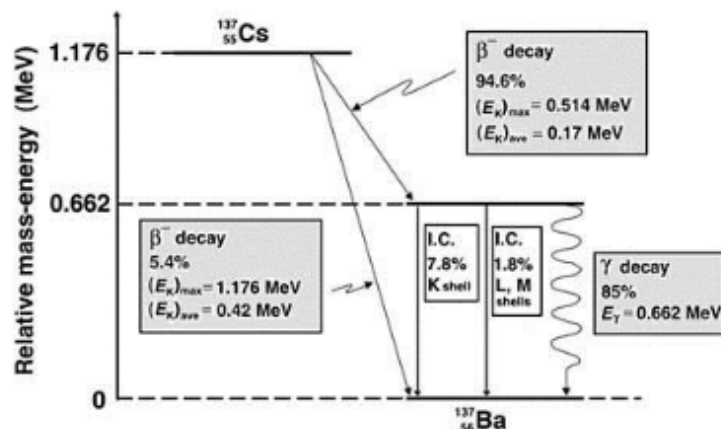
### ΘΕΜΑ 4<sup>ο</sup>

(α) Έστω σημειακή πηγή CS-137 ενεργότητας 12.56 MBq. Υπολογίστε το ρυθμό KERMA στον αέρα σε απόσταση 1 m από την πηγή ( $\mu_{\text{air}}/\rho = 0.077 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,  $\mu_{\text{en,air}}/\rho = 0.029 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,  $\rho_{\text{air}} = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ).

(β) Αν η εμβέλεια ηλεκτρονίων ενέργειας 662 keV στον αέρα είναι  $0.032 \text{ g/cm}^2$ , σχεδιάστε πρόχειρα στους ίδιους άξονες τη μεταβολή του KERMA και της δόσης στον αέρα συναρτήσει της απόστασης από την πηγή.

(γ) Αν η πηγή θωρακιστεί με 2 mm Μολύβδου ( $\mu/\rho_{\text{Pb}} = 0.111 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,  $\rho_{\text{Pb}} = 11.34 \text{ g/cm}^3$ ) πως θα μεταβληθεί ο ρυθμός KERMA που υπολογίσατε στο ερώτημα (α);

\* Δικαιολογείστε τις απαντήσεις σας αναφέροντας τυχόν παράγοντες που δεν λαμβάνετε υπόψη.





### **ΘΕΜΑ 3<sup>ο</sup>**

$10^6$  φωτόνια ενέργειας  $E=100$  keV προσπίπτουν σε απορροφητή άνθρακα πάχους  $4.5$  g/cm<sup>2</sup>.

(α) Υπολογίστε τον αριθμό αλληλεπιδράσεων, για κάθε είδος αλληλεπίδρασης.

(β) Υπολογίστε την ενέργεια που θα μετατραπεί σε κινητική ενέργεια φορτισμένων σωματιδίων, για κάθε είδος αλληλεπίδρασης.

(γ) Αποτελεί το σύνολο της ενέργειας που υπολογίσατε στο ερώτημα (β) ικανοποιητική προσέγγιση της δόσης στον απορροφητή; Δικαιολογήστε εν συντομία την απάντησή σας.

( $\sigma_{\text{coh}} = 0.072 \times 10^{-24}$  cm<sup>2</sup>/atom,  $\sigma_{\text{incoh}} = 2.924 \times 10^{-24}$  cm<sup>2</sup>/atom,  $\sigma_{\text{photo}} = 0.0176 \times 10^{-24}$  cm<sup>2</sup>/atom,  $\mu/\rho = 0.1512$  cm<sup>2</sup>/g,  $\mu_{\text{tr}}/\rho = 0.0213$  cm<sup>2</sup>/g).

---

**ΘΕΜΑ 3<sup>ο</sup>**

Ένα μήνα μετά από θεραπευτική χορήγηση  $100 \text{ mCi } ^{131}\text{I}$ , μετρήθηκε σε απόσταση  $1 \text{ m}$  από τον ασθενή ρυθμός δόσης  $5 \mu\text{Sv h}^{-1}$  λόγω της ενεργότητας  $^{131}\text{I}$  που έχει καθηλωθεί στον οργανισμό του ( $t_{1/2}=8$  ημέρες).

(α) Υπολογίστε τη συνολική δόση που θα απορροφήσει μέλος της οικογένειας του ασθενή θεωρώντας ότι θα βρίσκεται διαρκώς σε απόσταση  $1 \text{ m}$  από αυτόν.

(β) Βάσει του αποτελέσματος αυτού, θα επιτρέπατε στον ασθενή να επιστρέψει στην οικία του; Δικαιολογήστε σύντομα την απάντησή σας λαμβάνοντας υπόψη και την αρχή του διεθνούς συστήματος ακτινοπροστασίας που αφορά τα όρια δόσης.

---

**Έμμεσα ιοντίζουσα ακτινοβολία:**

**Σημειακό-ισοτροπικό μοντέλο ...**

**Πότε ισούται το collisional ΚΕΡΜΑ με τη Δόση...;**

**Έμμεσα ιοντίζουσα ακτινοβολία:  
Πότε ισούται το collisional ΚΕΡΜΑ με τη Δόση...;**

### **Υπό συνθήκες ηλεκτρονιακής ισορροπίας (CPE)**

**Συνθήκες ηλεκτρονιακής ισορροπίας υφίστανται σε όγκο  $v$  εάν κάθε φορτισμένο σωματίδιο δεδομένου είδους και ενέργειας που εγκαταλείπει τον  $v$ , αναπληρώνεται από ένα πανομοιότυπο σωματίδιο με την ίδια ενέργεια που εισέρχεται στον  $v$ .**

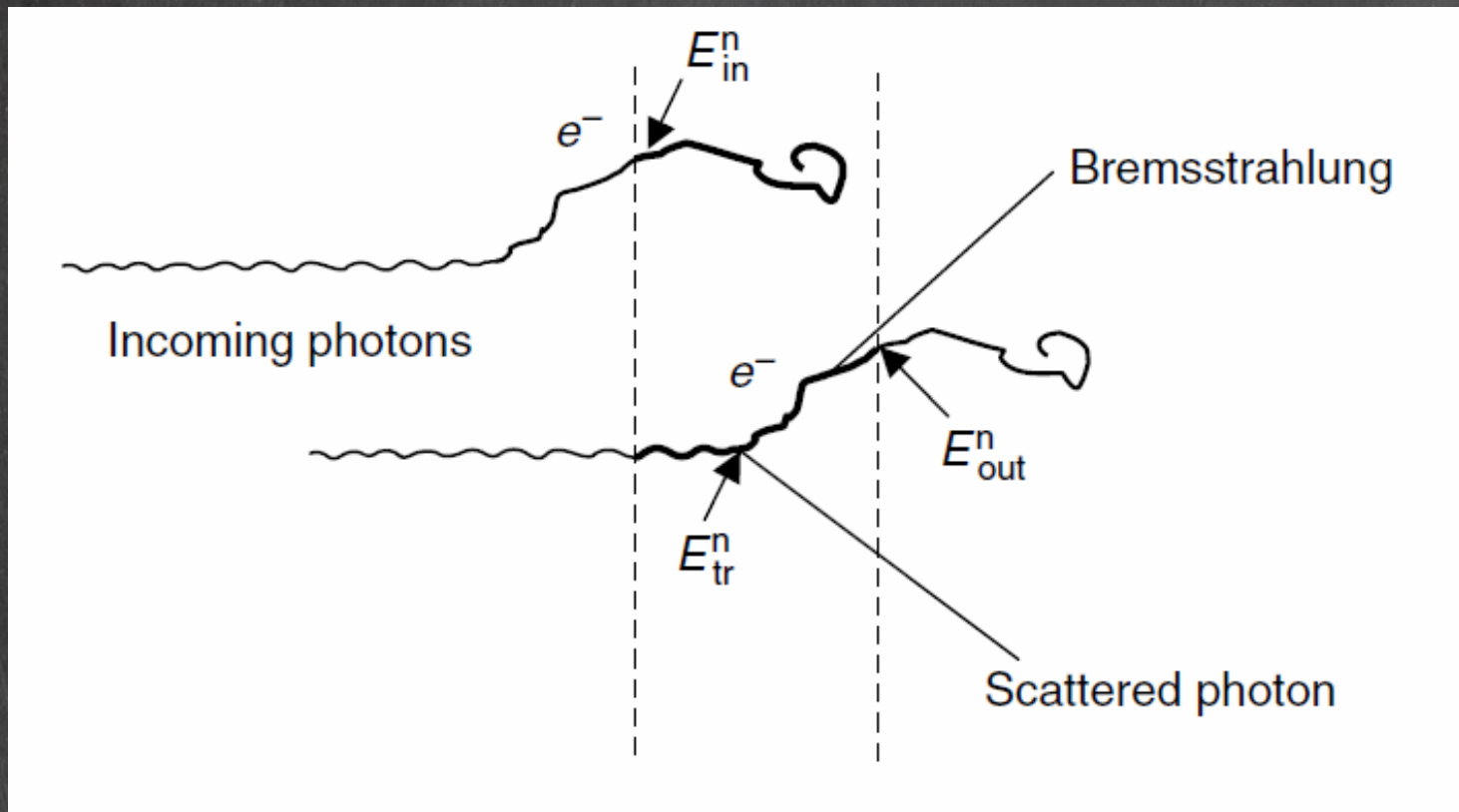
## Συνθήκες ηλεκτρονιακής ισορροπίας (CPE)

$$\varepsilon = E_{tr}^n - E_{out}^n + E_{in}^n$$

$$E_{in}^n = E_{out}^n$$

$$\varepsilon = E_{tr}^n$$

$$K_{col}^{CPE} = D$$



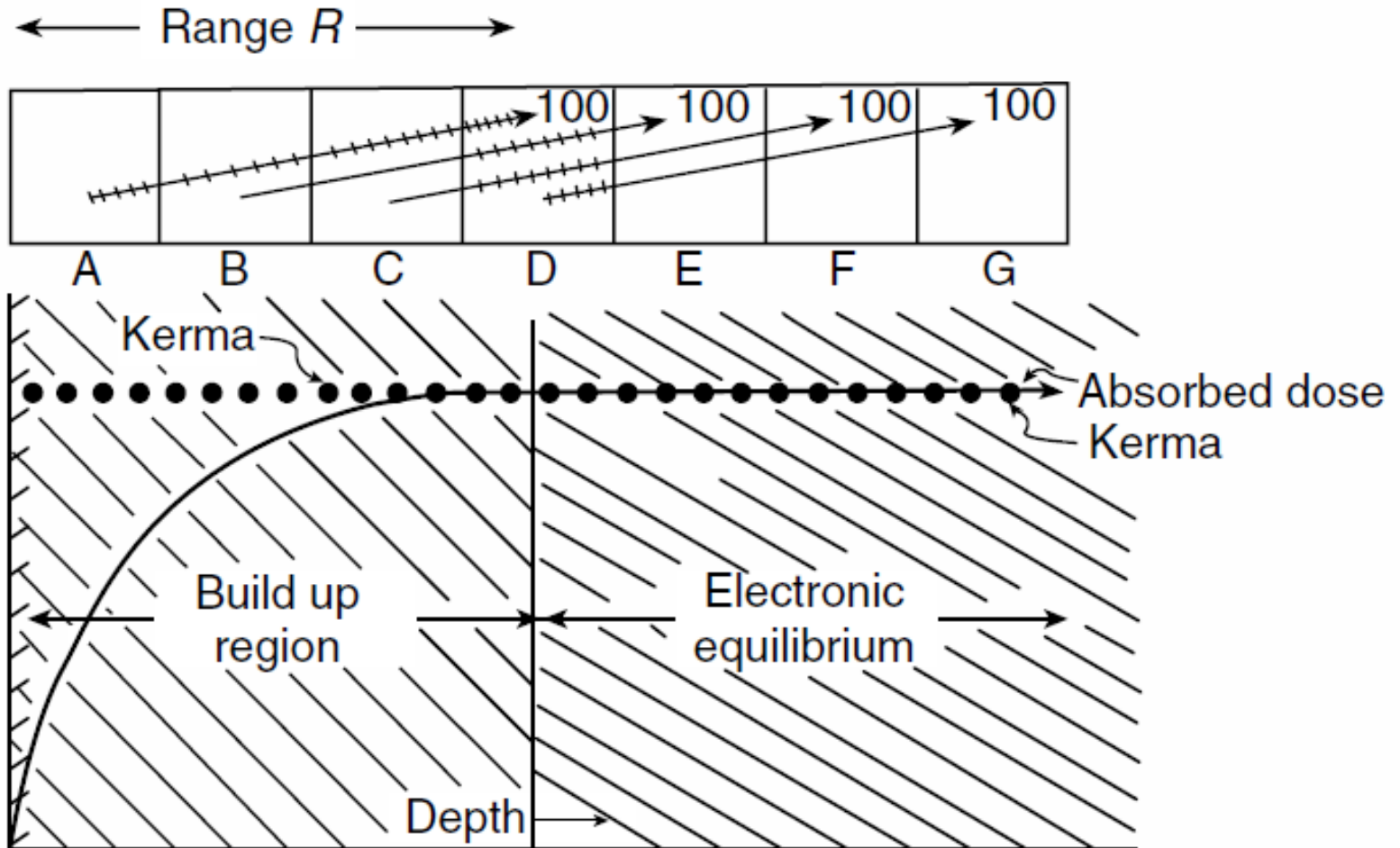
**Πότε υφίστανται συνθήκες ηλεκτρονιακής ισορροπίας...;**

**Όταν όγκος  $v$  περιέχεται σε όγκο  $V$  έτσι ώστε η απόσταση μεταξύ των ορίων τους είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη εμβέλεια των δευτερογενών φορτισμένων σωματιδίων, συνθήκες ηλεκτρονιακής ισορροπίας υφίστανται στον  $v$  όταν για τον  $V$  ισχύει:**

- 1. Ομοιογένεια ατομικής σύστασης**
- 2. Ομοιογένεια πυκνότητας**
- 3. Ομοιόμορφη ακτινοβολήση (ομοιόμορφο πεδίο έμμεσα ιοντίζουσας ακτινοβολίας και αμελητέα εξασθένιση)**
- 4. Απουσία ανομοιογενούς ηλεκτρικού ή μαγνητικού πεδίου**

Πότε υφίστανται συνθήκες ηλεκτρονικής ισορροπίας...;

Περιοχή επαύξησης της δόσης (build up)



**Πότε υφίστανται συνθήκες ηλεκτρονιακής ισορροπίας...;**

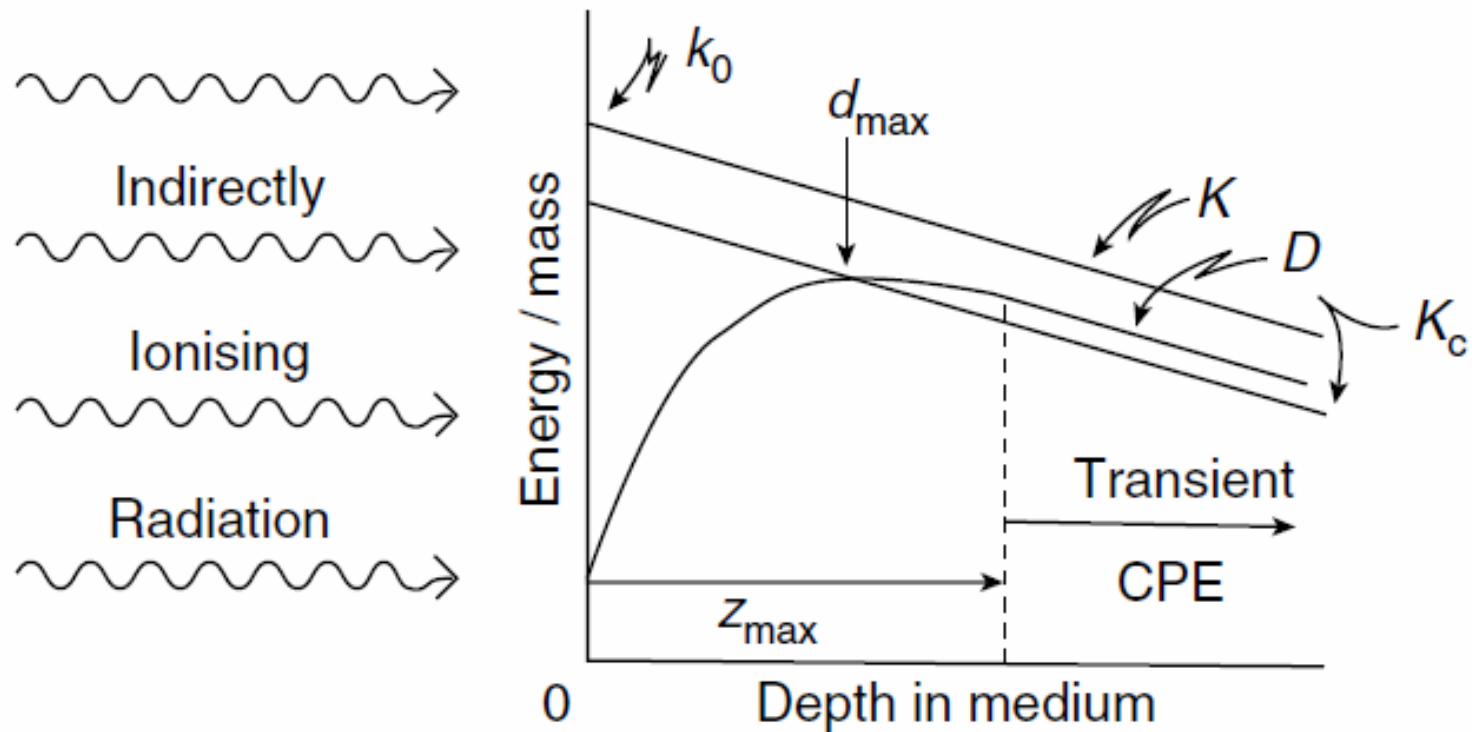
**Το αποτέλεσμα της εξασθένησης των φωτονίων**

Approximate Thickness of Water Required to Establish Transient Charged Particle Equilibrium.

Maximum Energy of Photons (MeV)	Approximate Thickness of Water for Equilibrium (mm)	Approximate Photon Attenuation (%)
0.3	0.1	0.03
0.6	0.4	0.1
1	0.8	0.3
2	2.5	0.8
3	8	2
6	15	4
8	25	6
10	30	7
15	50	9
20	60	11
30	80	13

Πότε υφίστανται συνθήκες ηλεκτρονιακής ισορροπίας...;

Το αποτέλεσμα της εξασθένησης των φωτονίων  
παροδική (transient) CPE



Συνθήκες ηλεκτρονιακής ισορροπίας **δεν** υφίστανται:

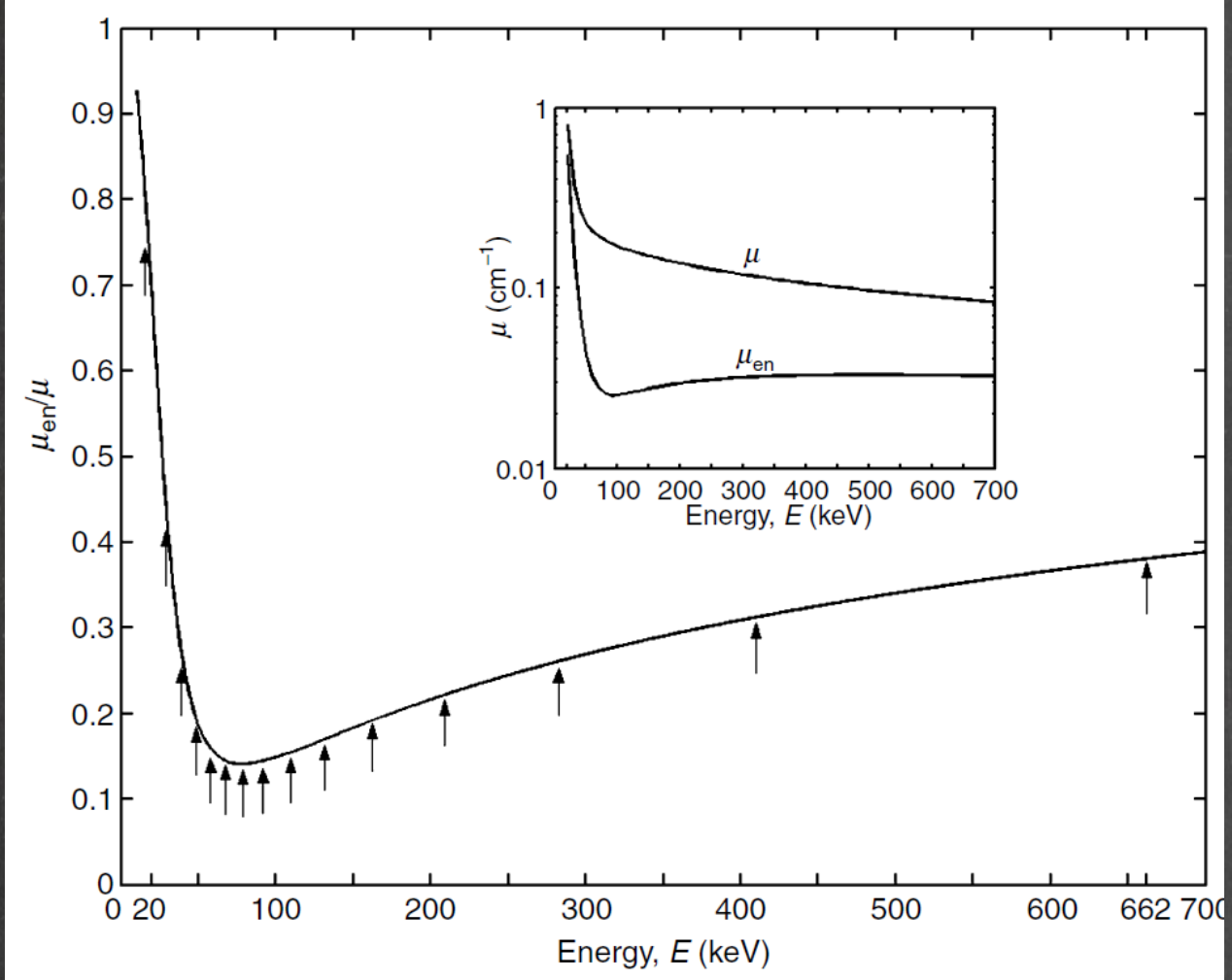
- Σε βάθος υλικού μικρότερου από την εμβέλεια των ενεργητικότερων δευτερογενών φορτισμένων σωματιδίων που παράγονται από τις αλληλεπιδράσεις με τη δέσμη
- Σε σημεία κοντά στα όρια του υλικού ή του πεδίου, αν αυτό είναι πεπερασμένων διαστάσεων σε σχέση με το ακτινοβολούμενο σώμα, ή σε δι-επιφάνειες μεταξύ διαφορετικών υλικών
- Όταν η εξασθένιση της πρωτογενούς δέσμης ακτινοβολίας κατά τη διάδοσή της σε ένα υλικό είναι σημαντική για αποστάσεις ίσες με την εμβέλεια των φορτισμένων σωματιδίων που παράγονται από τις αλληλεπιδράσεις με αυτή

**Πίσω στο απλό σημειακό-ισοτροπικό μοντέλο ...**

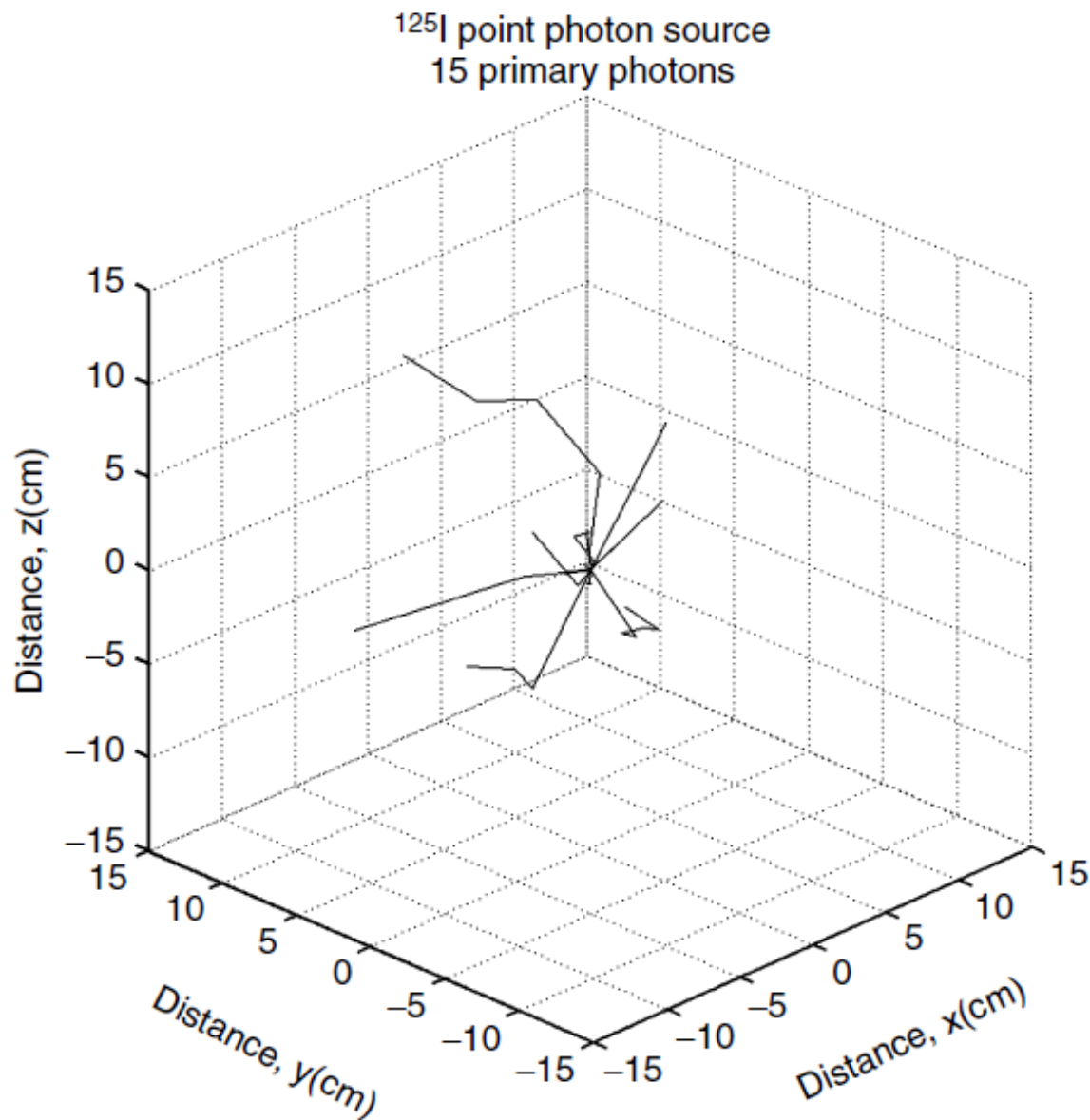
**Μπορούμε να υπολογίσουμε το ρυθμό δόσης σε  
απόσταση  $r$  από σημειακή πηγή γνωστής  
ενεργότητας, δεδομένων των συντελεστών  
αλληλεπίδρασης;**

**Υπό συνθήκες ηλεκτρονιακής ισορροπίας  
και μόνο για την πρωτογενή ακτινοβολία**

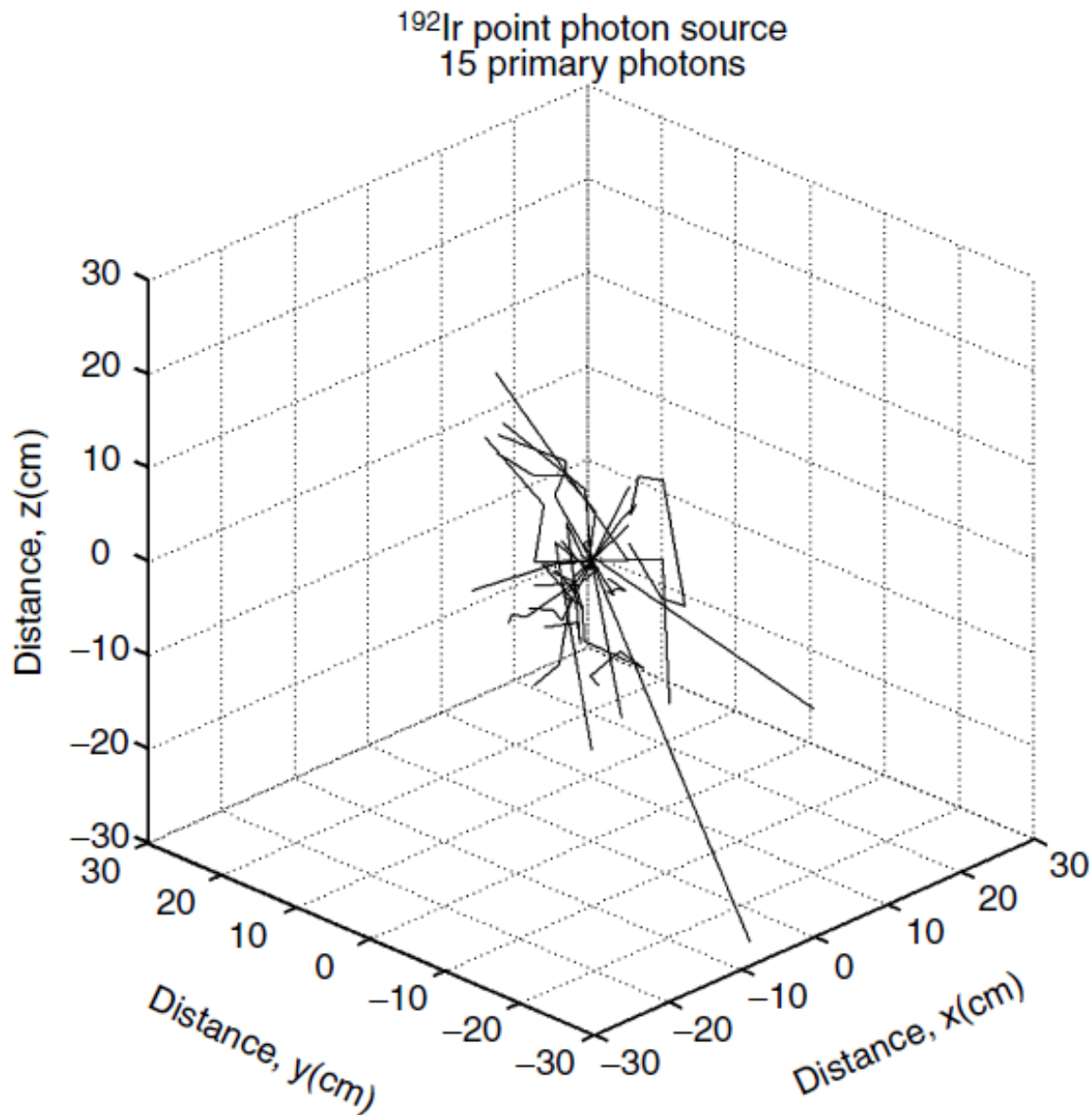
# Αντί σύνοψης ...



# Η συνδρομή της σκέδασης ...



# Η συνδρομή της σκέδασης ...



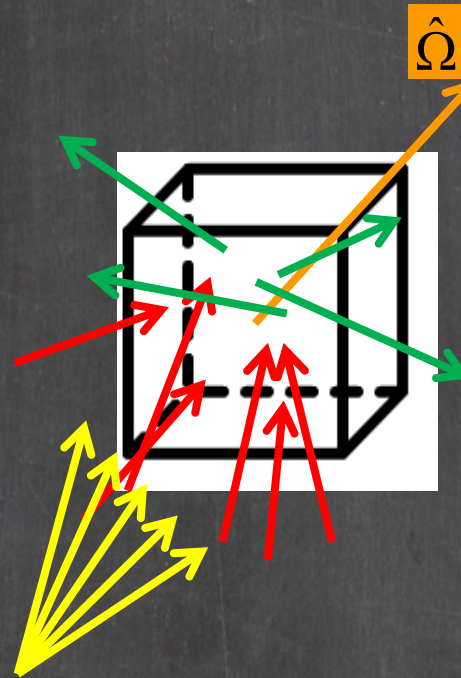
Υπάρχει εξίσωση που να περιλαμβάνει και τη σκεδαζόμενη;

Η βαθμίδα σε ένα στοιχείο του φασικού χώρου θα ισούται:

φ. που σκεδάζονται σε αυτό από τα υπόλοιπα

+ φ. που εκπέμπονται από πηγή σε αυτό

- φ. που απορροφούνται ή σκεδάζονται



$\hat{\Omega}$

$$\hat{\Omega} \cdot \nabla \Phi_{\Omega, E}(\mathbf{r}, E, \hat{\Omega}) =$$

$$Q_{sc}(\mathbf{r}, E, \hat{\Omega})$$

$$+ \frac{Q_{prim}(E, \hat{\Omega})}{4\pi} \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_p)$$

$$- \sigma_t(\mathbf{r}, E) \Phi_{\Omega, E}(\mathbf{r}, E, \hat{\Omega})$$

L.B.T.E.

Μπορεί να επιλυθεί;

$$\hat{\Omega} \cdot \nabla \Phi_{\Omega, E}^{\text{prim}} = \frac{Q_{\text{prim}}(E, \hat{\Omega})}{4\pi} \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_p) - \sigma_t(\mathbf{r}, E) \Phi_{\Omega, E}^{\text{prim}}$$



$$\hat{\Omega} \cdot \nabla \Phi_{\Omega, E}^{\text{sc}} = Q_{\text{sc}} - \sigma_t(\mathbf{r}, E) \Phi_{\Omega, E}^{\text{prim}}$$



$$Q_{\text{sc}}(\mathbf{r}, E, \hat{\Omega}) = \int_0^{\infty} \int_{04\pi} \sigma_s(\mathbf{r}, E' \rightarrow E, \hat{\Omega} \cdot \hat{\Omega}') \Phi_{\Omega, E'}(\mathbf{r}, E', \hat{\Omega}') d\hat{\Omega}' dE'$$

Εναλλακτικές:

Ημι-εμπειρικές μέθοδοι & στοχαστικοί (Monte Carlo) ή  
ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι  
(L.B.T.E. equation solvers, μέθοδοι υπέρθεσης, ...)

# Η αρχή της δοσιμετρίας με προσομοίωση Monte Carlo

Απλοί αναλυτικοί αλγόριθμοι δεν μπορούν να λάβουν υπόψη τη σκεδαζόμενη

- Εφόσον γνωρίζουμε τη Φυσική της διάδοσης ιοντ. ακτ. στην ύλη (κατανομές πιθανότητας αλληλεπίδρασης ως προς: θέση, είδος, κατανομή ενέργειας – κατεύθυνσης), μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις αναμενόμενες τιμές;
- Χρειαζόμαστε μια μέθοδο προσομοίωσης της φυσικής διαδικασίας που να λαμβάνει υπόψη συνολικά τις κατανομές πιθανότητας για κάθε φαινόμενο αλληλεπίδρασης

# Η αρχή της δοσιμετρίας με προσομοίωση Monte Carlo

Σύμφωνα με το θεώρημα κεντρικής τιμής, το άθροισμα ενός μεγάλου αριθμού όμοιων, ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών ακολουθεί κανονική κατανομή.

Έτσι, αν θέλω να υπολογίσω μια **άγνωστη ποσότητα**,  $m$ , με  $k$  μια **τυχαία μεταβλητή** με αναμενόμενη τιμή  $E(k)=m$  και διακύμανση  $Var(k)=b^2$  εάν  $k_1, k_2, \dots, k_N$  είναι  $N$  **ΤΥΧΑΙΑ** επιλεγμένες τιμές του  $k$ ,

τότε: το  $\sum_{i=1}^N k_i$  ακολουθεί κανονική κατανομή με  $E(\sum_{i=1}^N k_i) = Nm$  και  $Var(\sum_{i=1}^N k_i) = Nb^2$

Ή ισοδύναμα:

$$P(Nm - 3b\sqrt{N} < \sum_{i=1}^N k_i < Nm + 3b\sqrt{N}) \approx 0.997$$

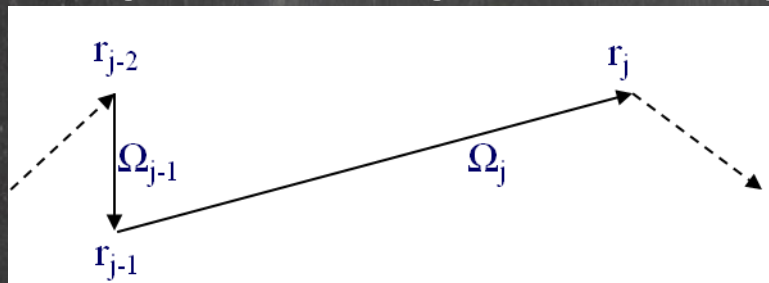
ή:

$$P(-3b/\sqrt{N} < \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i - m < 3b/\sqrt{N}) \approx 0.997$$

Έτσι αν θέλω να υπολογίσω την **ενεργειακή ροή** σε σημείο  $r$ , μπορώ να υπολογίσω τη μέση τιμή της συνεισφοράς από την «τροχιά»  $N$  **φωτονίων που θα επιλέξω τυχαία** από την κατανομή πιθανότητας που δίνει όλες τις πιθανές τροχιές

## Η αρχή της δοσιμετρίας με προσομοίωση Monte Carlo

- Γνωρίζω την κατανομή πιθανότητας όλων των πιθανών τροχιών των φωτονίων;
- Κάθε τροχιά αποτελείται από διαδοχικές καταστάσεις  $\mathbf{S}_j(\mathbf{r}_j, \Omega_j, E_j)$  πριν από κάθε αλληλεπίδραση  $j$ .
- Η πιθανότητα εμφάνισης κάθε κατάστασης  $j$  εξαρτάται μόνο από την πιθανότητα εμφάνισης της προηγούμενης κατάστασης  $j-1$ .
- Με άλλα λόγια : την πιθανότητα φωτόνιο να αλληλεπιδράσει στο  $\mathbf{r}_{j-1}$ , την πιθανότητα δεδομένου είδους αλληλεπίδρασης και την πιθανότητα κατά την αλληλεπίδραση αυτή το φωτόνιο να σκεδαστεί σε κατεύθυνση  $\Omega_j$  με ενέργεια  $E_j$  δεδομένων των  $\Omega_{j-1}$  και  $E_{j-1}$ .
- Αυτές οι κατανομές πιθανότητας είναι γνωστές!



- Έτσι αρκεί να έχω μια μέθοδο ΤΥΧΑΙΑΣ δειγματοληψίας από τις γνωστές κατανομές πιθανότητας

## Πως επιλέγω τυχαία από γνωστή κατανομή πιθανότητας;

Υπάρχουν πολλές μαθηματικές μέθοδοι. Π.χ.:

- Θεώρημα αντιστροφής

Έστω  $x$  συνεχής τυχαία μεταβλητή στο  $[a, b]$  με πυκνότητα πιθανότητας  $f(x)$  και συνάρτηση κατανομής πιθανότητας  $F(x)$ . Δεδομένου τυχαίου,  $r$ , στο  $[0, 1]$ , μια τιμή  $x^*$  του  $x$  μπορεί να επιλεγεί τυχαία ως:

$$r = F(x^*) = \int_a^{x^*} f(x) dx$$

- Αν  $x$  διακριτή τυχαία μεταβλητή με τιμές,  $x_i$  πιθανότητας,  $P_i$  ώστε:

$$\sum_{i=1}^N P_i = 1$$

Δεδομένου τυχαίου,  $r$ , στο διάστημα  $[0, 1]$ , μια τιμή  $x^*$  του  $x$  μπορεί να επιλεγεί τυχαία ως:

$$x^* = x_j \text{ όπου } j = \min \left\{ j : r < \sum_{i=1}^j P_i \right\}$$

# Απλά παραδείγματα για σημειακή πηγή

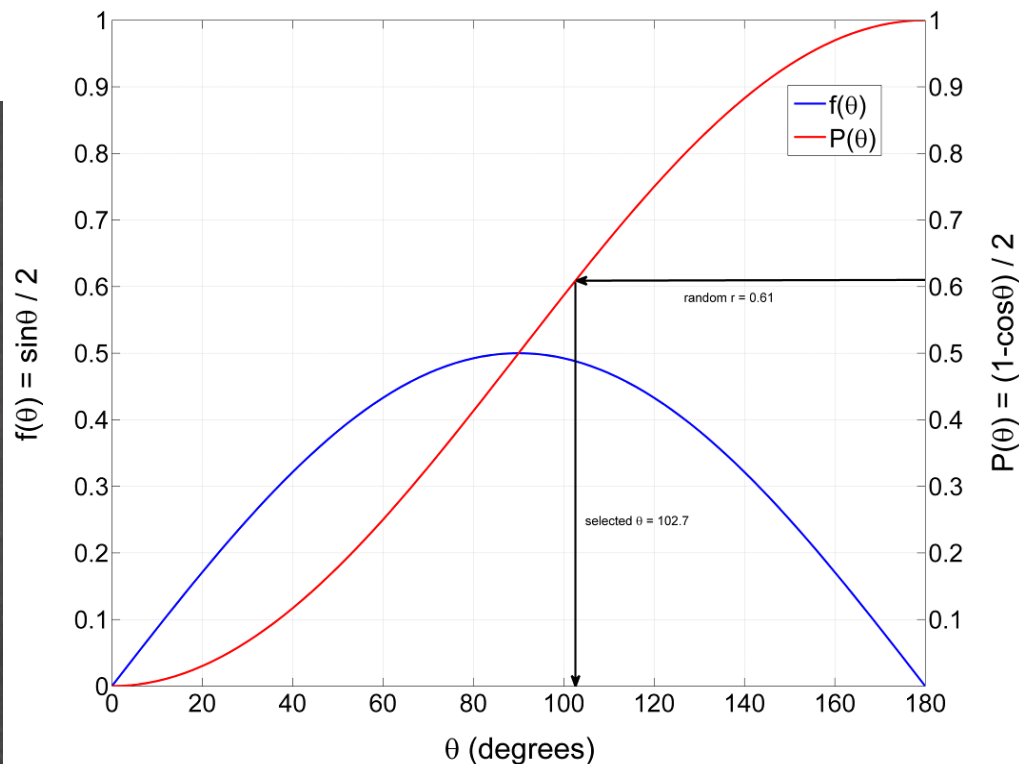
- Επιλογή κατεύθυνσης εκπεμπόμενου φωτονίου

Η εκπομπή είναι ισότροπη και σύμφωνα με την πιθανότητα εκπομπής σε στοιχείο στερεάς γωνίας  $d\Omega$  :

$$p(\theta, \phi)d\theta d\phi = \frac{d\Omega}{4\pi} = \frac{\sin\theta d\theta d\phi}{4\pi}$$

$$p(\theta)d\theta = \frac{\sin\theta d\theta}{2} \quad \text{and} \quad r = P(\theta^*) = \int_0^{\theta^*} \frac{\sin\theta d\theta}{2} \Rightarrow r = \frac{1 - \cos\theta^*}{2} \Rightarrow \cos\theta^* = 1 - 2r$$

$$p(\phi)d\phi = \frac{d\phi}{2\pi} \quad \text{and} \quad r' = P(\phi^*) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\phi^*} d\phi \Rightarrow \phi^* = 2\pi r'$$

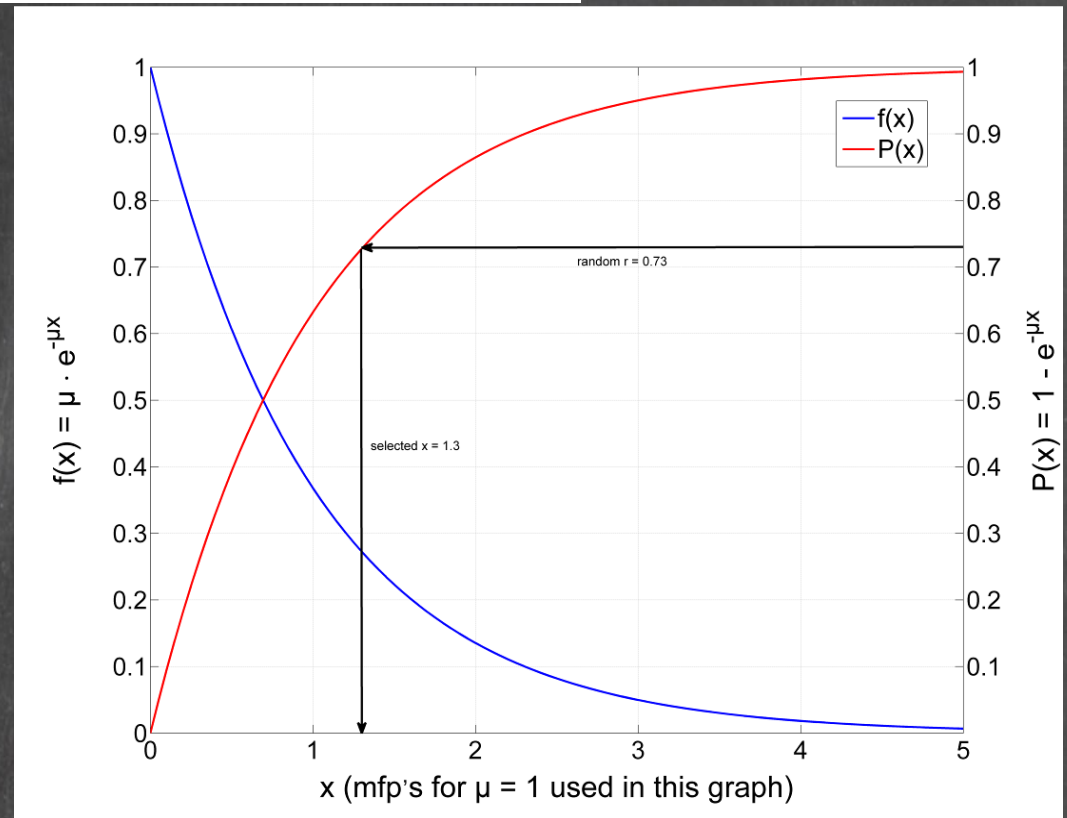


# Απλά παραδείγματα για σημειακή πηγή

- Επιλογή σημείου αλληλεπίδρασης

Η πιθανότητα αλληλεπίδρασης σε  $dx$  μετά από διέλευση απόστασης  $x$  είναι  $\mu \exp(-\mu x)$  οπότε:

$$r = P(x) = \int_0^{x^*} \mu \exp(-\mu x) dx \Rightarrow r = -\exp(-\mu x^*) + 1 \Rightarrow x^* = -\frac{1}{\mu} \ln(1-r) = -\frac{1}{\mu} \ln(r)$$



# Απλά παραδείγματα για σημειακή πηγή

- Επιλογή είδους αλληλεπίδρασης

Το είδος αλληλεπίδρασης είναι διακριτή μεταβλητή με  $i$  τιμές ώστε  $P_i = \mu_i / \mu_{\text{total}}$  και επιλέγεται το είδος  $j$  ώστε:

$$j = \min \left\{ j : r < \sum_{i=1}^j P_i \right\}$$

# Η αρχή της δοσιμετρίας με προσομοίωση Monte Carlo



# Η αρχή της δοσιμετρίας με προσομοίωση Monte Carlo

Στατιστική και ακρίβεια

$$P\left(-\frac{3b}{\sqrt{N}} < \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i - m < \frac{3b}{\sqrt{N}}\right) \approx 0.997$$

Η τυπική απόκλιση της άγνωστης ποσότητας  $m$  δεν είναι γνωστή αλλά για  $N \gg$

η  $\bar{k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i$  προσεγγίζει το  $m$  και η διακύμανση  $Var(k) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (k_i - \bar{k})^2 \approx \bar{k}^2 - \bar{k}^2$

προσεγγίζει το  $b$ .

Συνεπώς η  $\sqrt{\frac{Var(k)}{N}}$  διαμορφώνει το διάστημα εμπιστοσύνης του αποτελέσματος και θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη.

# Popular, nonproprietary codes, benchmarked for brachytherapy dosimetry\*

Code	Operating System	Availability/Li cense	Applications	Significant features
EGSnrc	All major modern operating systems (portions available for a limited set)	Through NRC web (GitHub) / General Public License for research & education, separate NRC license for commercial use	EGSnrc is a set of functions and subroutines for coupled ph/el transport mainly in Medical Physics. For an application, a user code is required (in Mortran, Fortran, C, C++). Major applications are available, including brachytherapy.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Accurate condensed history technique implementation for charged particle transport.</li> <li>• More accurate Physics (rel. to its predecessor).</li> <li>• Choice of cross sections tabulation/data.</li> <li>• Faster than other codes for charged particle transport.</li> <li>• General purpose geometry package + utility classes.</li> </ul>

\* According to material from Appendix D in: W.L. Dunn. J. K. Shultis (Eds), Exploring Monte Carlo Methods. CRC Press, Elsevier B.V. © 2012

# Popular, nonproprietary codes, benchmarked for brachytherapy dosimetry\*

Code	Operating System	Availability/Li cense	Applications	Significant features
GEANT4	Linux variants, Windows and Mac OS X (verified and supported on specific configurations)	Through CERN web subject to the open-source conditions of the Geant4 license (cannot be included in whole or in part in patented applications)	General purpose simulation of particle transport primarily for high-energy and medical physics Comprehensive geometry and physics modeling capabilities are embedded in a flexible structure base using object-oriented technology and C++ A large number of specialized applications based on GEANT4 are available including one for brachytherapy.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Users can choose existing components, tailor and adapt them, or create their own.</li> <li>• A choice of physics models is offered for many physics processes with different trade-offs between accuracy and CPU cost.</li> <li>• Tools for optimization of configurations of geometry and physics are also provided.</li> <li>• Combinations of Physical processes for typical applications are recommended in Physics lists.</li> <li>• Powerful geometry module.</li> <li>• Range of visualization options.</li> </ul>

\*According to material from Appendix D in: W.L. Dunn. J. K. Shultis (Eds),  
Exploring Monte Carlo Methods. CRC Press, Elsevier B.V. © 2012

# Popular, nonproprietary codes, benchmarked for brachytherapy dosimetry\*

Code	Operating System	Availability/License	Applications	Significant features
MCNP6	Supported on most operating systems (32/64-bit) including Windows, Mac OS X, Linux, and UNIX-like.	US: through the Radiation Safety Information Computational Center (RSICC) Europe: to members of the Nuclear Energy Agency (NEA) Data Bank Japan: through the Research Organization for Information Science and Technology (RIST). Limited license and export control regulations restrict the distribution of Fortran source code.	General purpose simulation of particle transport primarily for nuclear applications and medical physics.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extensive geometry, source definition, and tallying capabilities.</li> <li>• Built in variance reduction techniques.</li> <li>• Straightforward generation of structured input files for specific applications.</li> </ul>

\* According to material from Appendix D in: W.L. Dunn, J. K. Shultis (Eds), Exploring Monte Carlo Methods. CRC Press, Elsevier B.V. © 2012

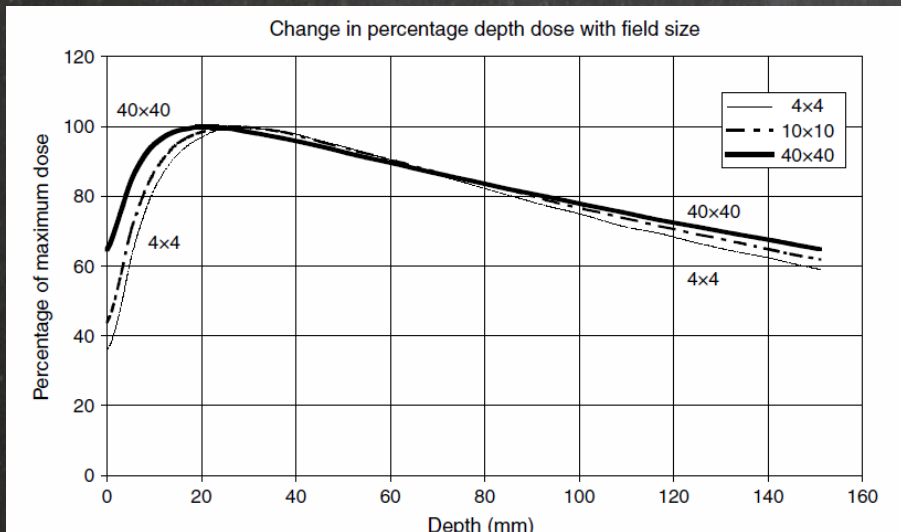
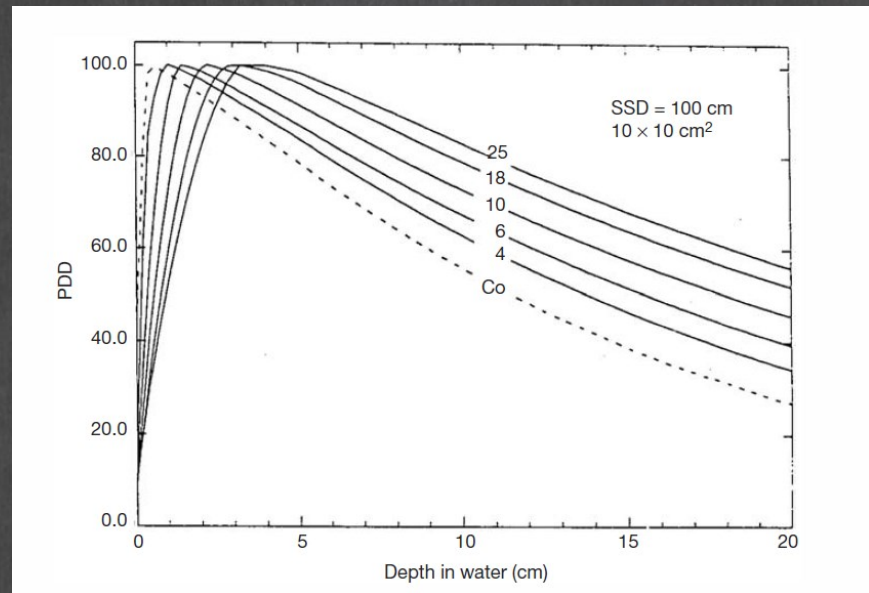
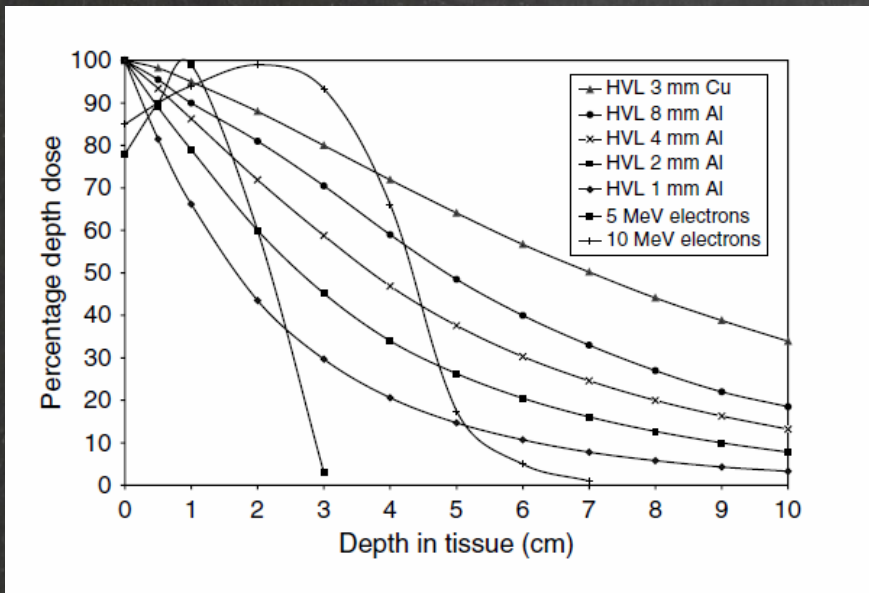
# Popular, nonproprietary codes, benchmarked for brachytherapy dosimetry\*



Code	Operating System	Availability/License	Applications	Significant features
Penelope	Written in FORTRAN and can be run on any computer with FORTRAN 77 (or higher) compiler. Geometry viewers run under Windows.	Through the Nuclear Energy Agency (NEA) Data Bank and the Radiation Safety Information Computational Center (RSICC) as open software.	Simulation of coupled electron-photon transport in material structures consisting of homogeneous bodies limited by quadratic surfaces. Structured as a set of subroutine packages. User should write a steering main program or build upon the generic one provided.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Particularly well adapted to simulations of electron transport at low and intermediate energies</li></ul>

\*According to material from Appendix D in: W.L. Dunn. J. K. Shultis (Eds),  
Exploring Monte Carlo Methods. CRC Press, Elsevier B.V. © 2012

# Καμπύλες δόσης – βάθους (PDD)



<sup>60</sup>Co:  
z<sub>max</sub> = 5mm

MV δέσμες:  
z<sub>max</sub> [cm] = E<sub>max</sub> [MeV] / 4

## 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](http://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