

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

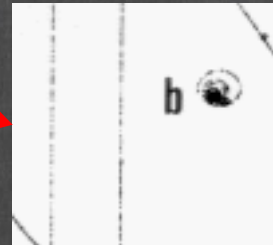
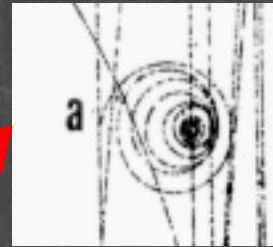
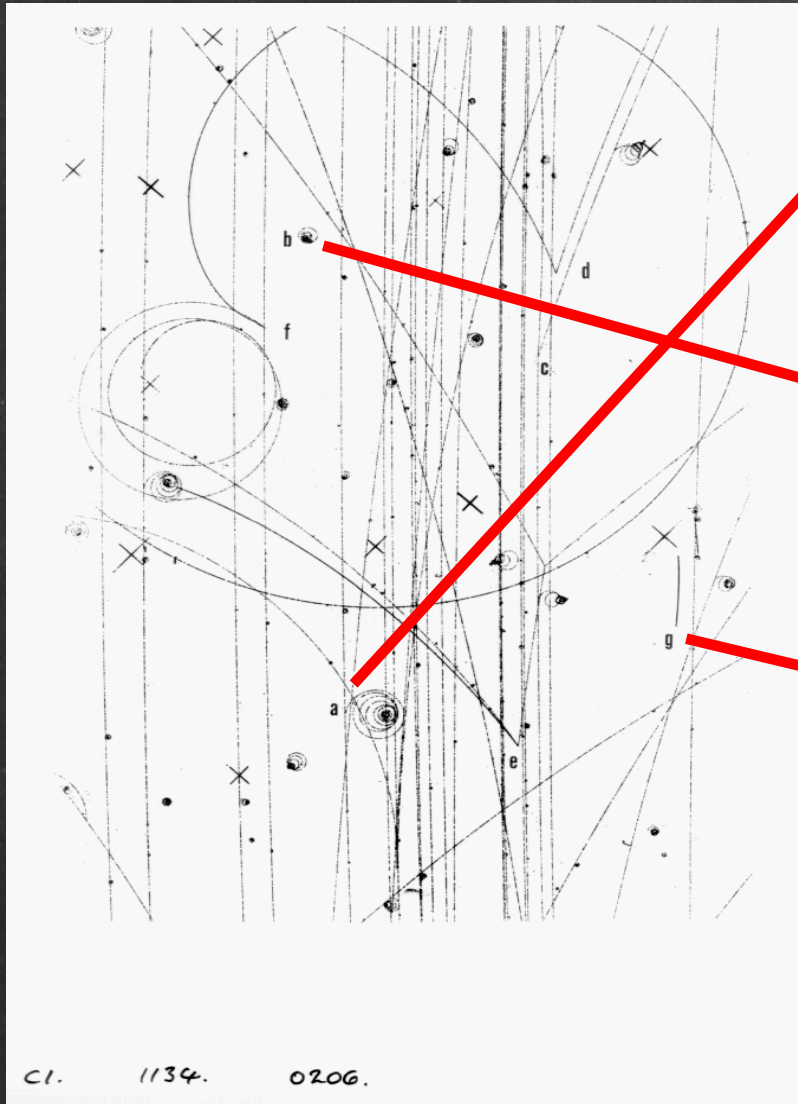


ppapagi@med.uoa.gr



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

Απώλεια ενέργειας κατά την διαδρομή φορτισμένων σωματιδίων στην ύλη



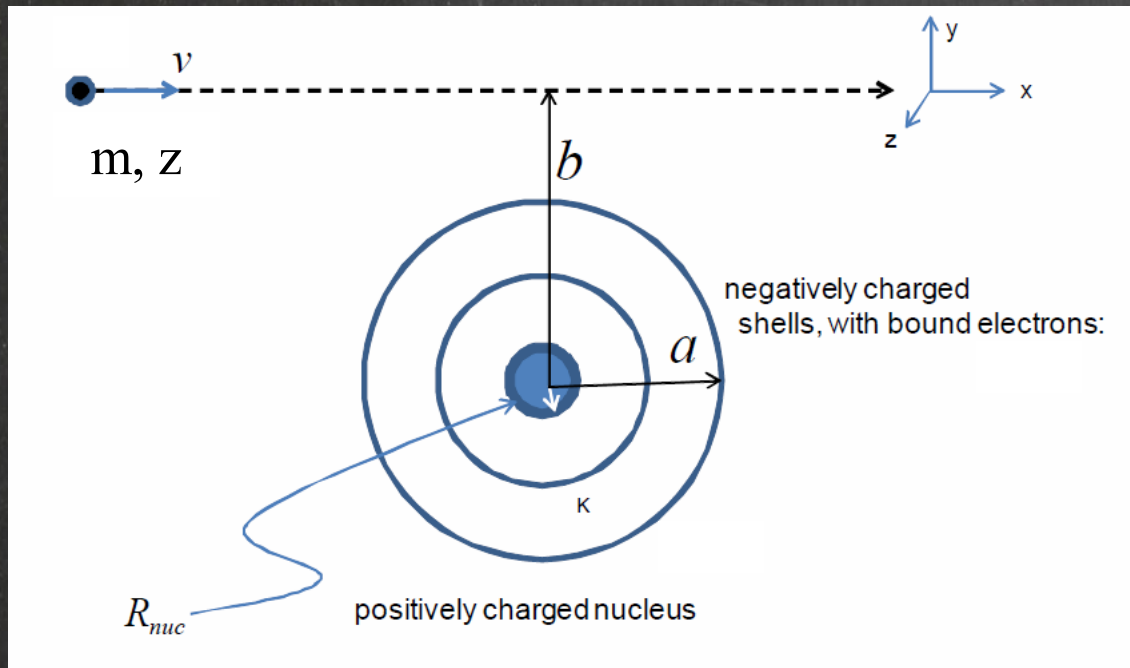
a. Electron recoiling from collision with beam (K^-)

b. Electron recoiling from collision with photon

g. Interaction of a neutral particle (neutron) with a proton. The recoiling proton leaves the dark track

<http://epweb2.ph.bham.ac.uk/user/watkins/seeweb/Bubble.htm>

Απώλεια ενέργειας κατά την διαδρομή φορτισμένων σωματιδίων στην ύλη



$b \gg a$: soft collisions

Διεγέρσεις, ιονισμοί

$b \sim a$: hard collisions

Διεγέρσεις, ιονισμοί με πιθανή μεγάλη μεταφορά E

$b \sim R_{nuc}$: elastic collisions + bremsstrahlung

Εκπομπή Η/Μ ακτινοβολίας

$b < R_{nuc}$: nuclear reactions

Απώλεια ενέργειας κατά την διαδρομή φορτισμένων σωματιδίων στην ύλη

Απώλεια ενέργειας λόγω
διεγέρσεων & ιονισμών

Μεγάλος αριθμός αλλ/σεων με την κατανομή e^- του υλικού, μικρής κατά μέσο όρο απώλειας ενέργειας

Απώλεια ενέργειας λόγω
εκπομπής Η/Μ ακτινοβολίας

Μικρός αριθμός αλλ/σεων με τους πυρήνες του υλικού σημαντικής απώλειας ενέργειας

Ποσοτικοποίηση της απώλειας ενέργειας

Μαζική ανασχετική ισχύς υλικού

4.4 Mass Stopping Power

The *mass stopping power*, S/ρ , of a material, for charged particles of a given type and energy, is the quotient of dE by ρdl , where dE is the mean energy lost by the charged particles in traversing a distance dl in the material of density ρ , thus

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dl}.$$

Unit: $\text{J m}^2 \text{kg}^{-1}$

Απώλεια ενέργειας βαρέων φορτισμένων σωματιδίων λόγω διεγέρσεων & ιονισμών

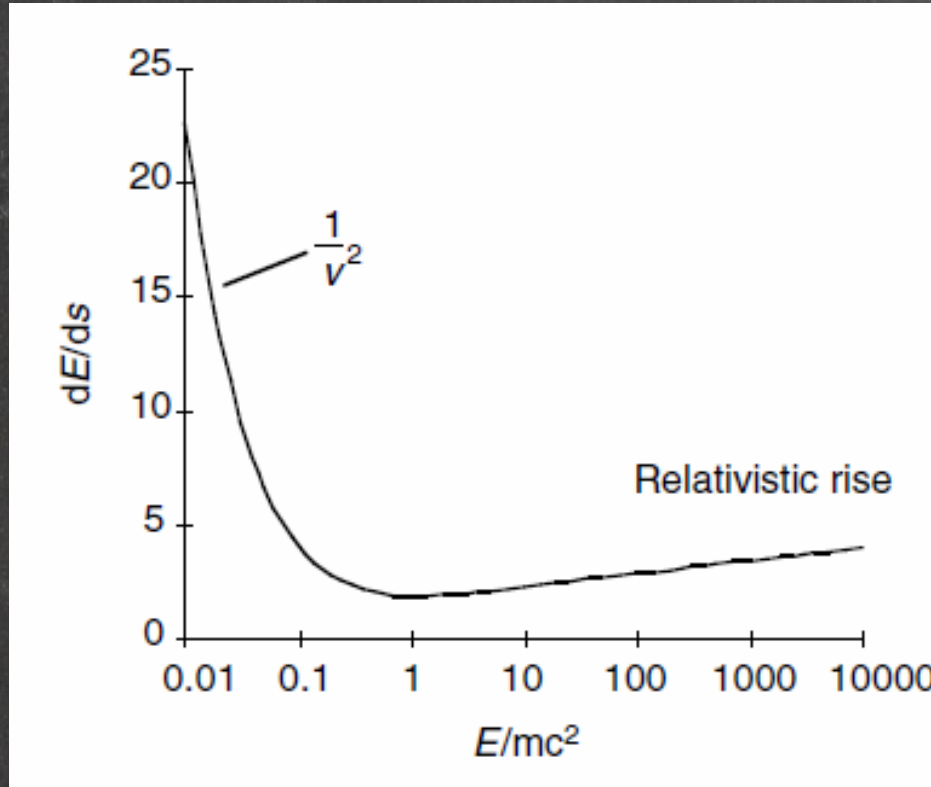
$$S_{col} = \frac{dE}{dx_{col}} = 4\pi r_0^2 \rho \frac{ZN_A}{AB} \frac{z^2 mc^2}{\beta^2} \left\{ \left[\ln \left(\frac{2mc^2 \beta^2}{I(1-\beta^2)} \right) \right] - \beta^2 - \sum_i \frac{C_i}{Z} \right\}$$

Απώλεια ενέργειας e- λόγω διεγέρσεων & ιονισμών

$$S_{col} = \frac{dE}{dx_{col}} = 2\pi r_0^2 \rho \frac{ZN_A}{AB} \frac{mc^2}{\beta^2} \left[\ln \frac{T^2 (T + 2mc^2)}{2mc^2 I^2} + F(T/mc^2) - \delta \right]$$

Από ποιους παράγοντες εξαρτάται η απώλεια ενέργειας ανά μονάδα διαδρομής ή ανασχετική ισχύς ενός υλικού ???

$1/\beta^2$ και T



$$S_{col} = \frac{dE}{dx_{col}} = 2\pi r_0^2 \rho \frac{Z N_A}{A B} \frac{mc^2}{\beta^2} \left[\ln \frac{T^2 (T + 2mc^2)}{2mc^2 I^2} + F(T/mc^2) - \delta \right]$$

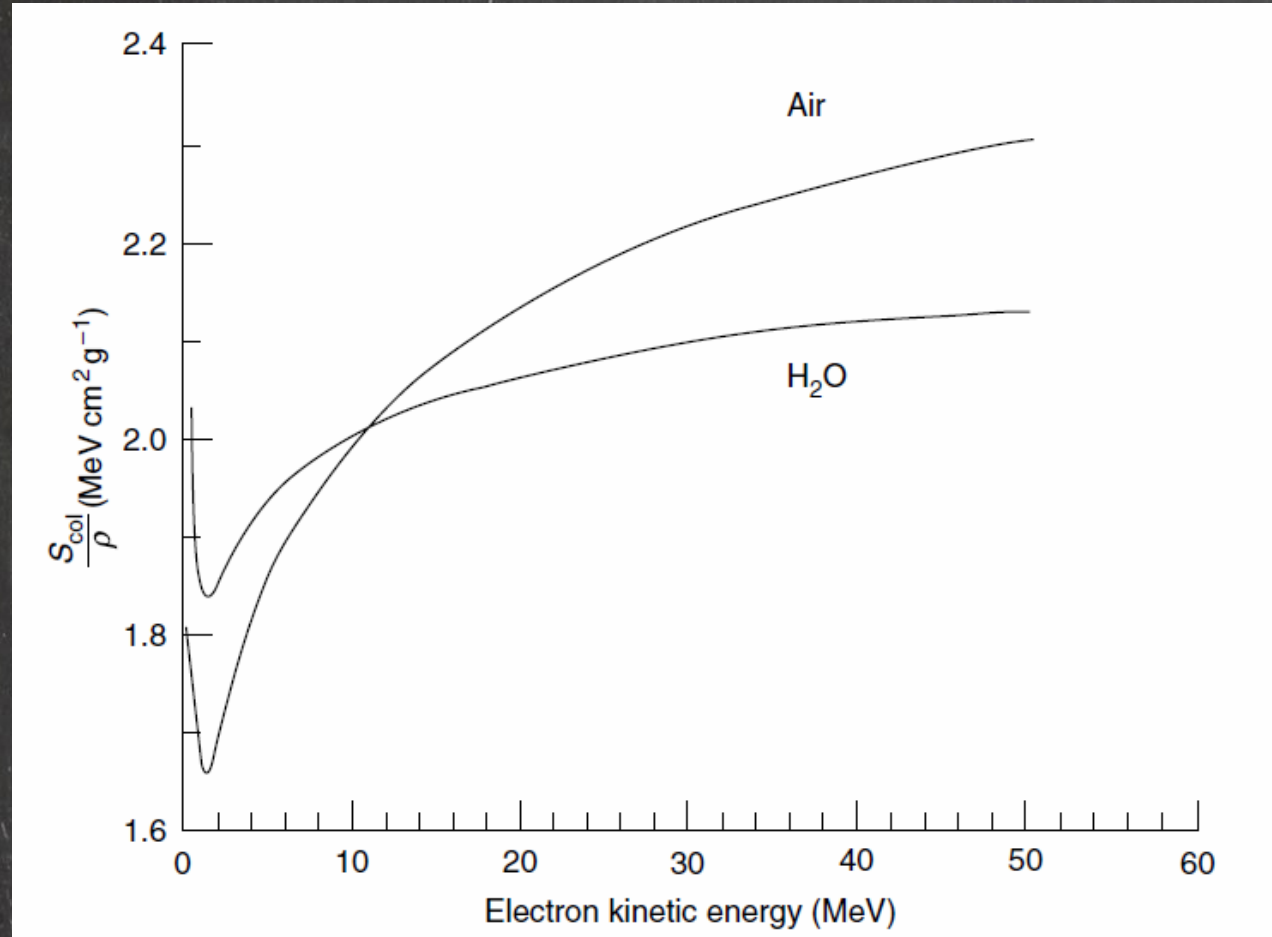
Πυκνότητα, $\langle Z/A \rangle$ και μέση ενέργεια διέγερσης I

Mean Excitation Energies, I , and Other Quantities Relevant to the Evaluation of the Collision Stopping Power of Selected Human Tissues and Other Materials of Dosimetric Interest

Material	I (eV)	$\langle Z/A \rangle$	Density (g cm ⁻³)
Adipose tissue (ICRP)	63.2	0.558468	0.920
Air (dry)	85.7	0.499190	1.205×10^{-3}
Bone, compact (ICRU)	91.9	0.530103	1.850
Bone, cortical (ICRP)	106.4	0.521299	1.850
Ferrous-sulphate dosimeter solution	76.3	0.553282	1.024
Lithium fluoride	94.0	0.462617	2.635
Muscle, skeletal (ICRP)	75.3	0.549378	1.040
Muscle, striated (ICRU)	74.7	0.550051	1.040
Photographic emulsion	331.0	0.454532	3.815
PMMA (lucite, perspex)	74.0	0.539369	1.190
Polystyrene	68.7	0.537680	1.060
Water (liquid)	75.0	0.555087	1.000

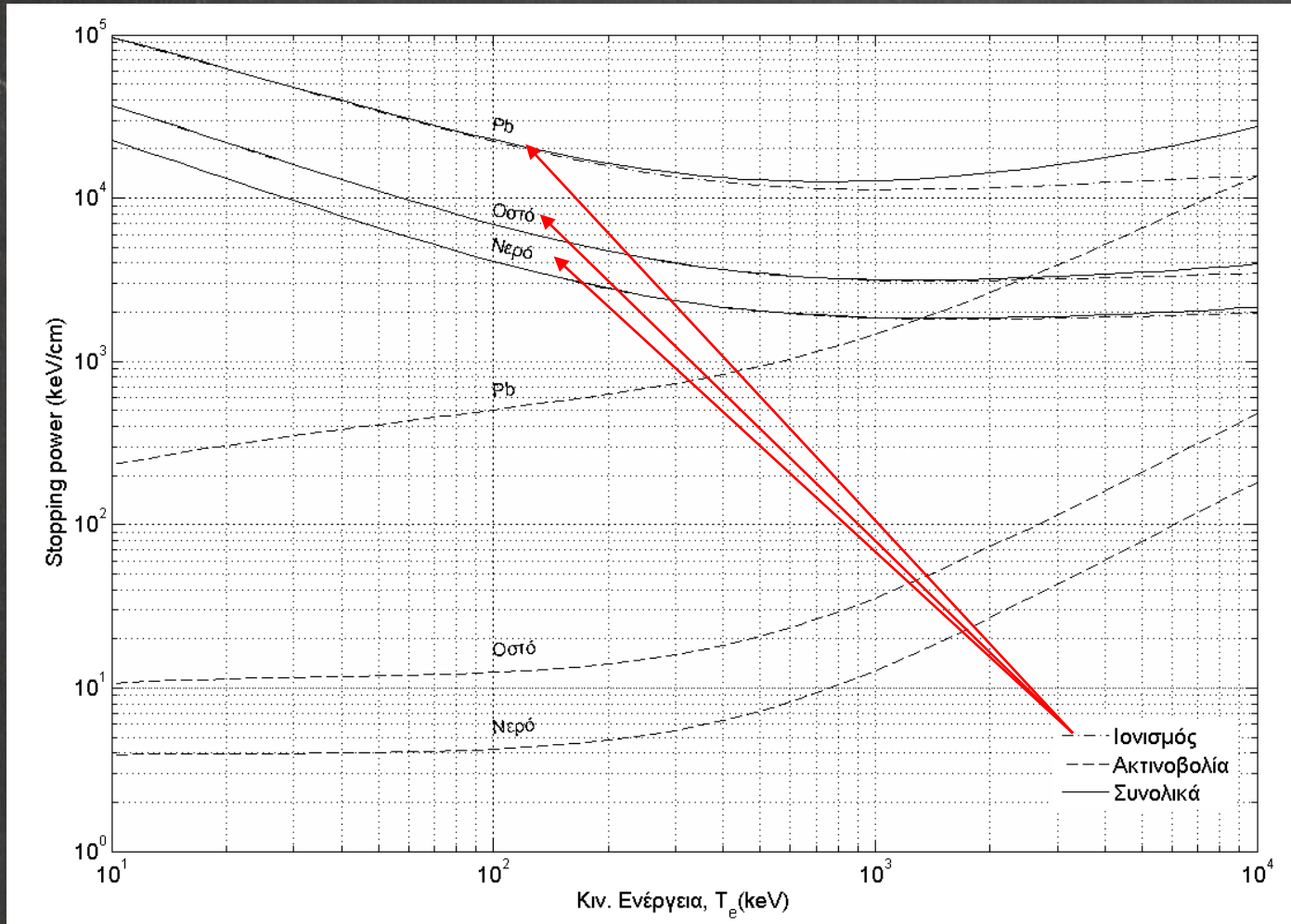
$$S_{col} = \frac{dE}{dx_{col}} = 2\pi r_0^2 \rho \frac{ZN_A}{AB} \frac{mc^2}{\beta^2} \left[\ln \frac{T^2 (T + 2mc^2)}{2mc^2 I^2} + F(T/mc^2) - \delta \right]$$

Διόρθωση πυκνότητας ή πόλωσης, δ για σχετικιστικές ταχύτητες

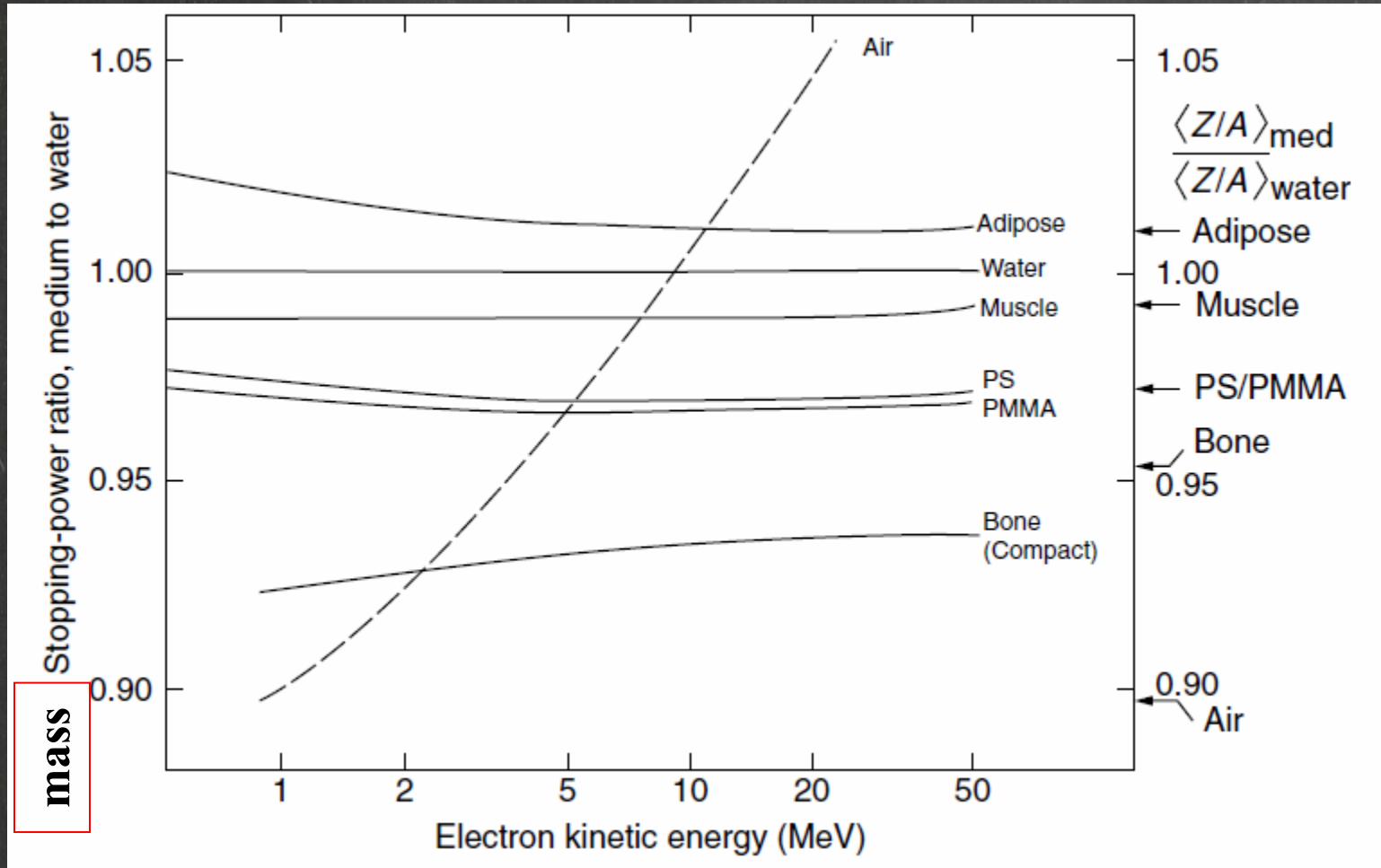


$$S_{col} = \frac{dE}{dx_{col}} = 2\pi r_0^2 \rho \frac{ZN_A}{AB} \frac{mc^2}{\beta^2} \left[\ln \frac{T^2 (T + 2mc^2)}{2mc^2 I^2} + F(T/mc^2) - \delta \right]$$

Συνολικά: Απώλεια ενέργειας e^- λόγω διεγέρσεων & ιονισμών



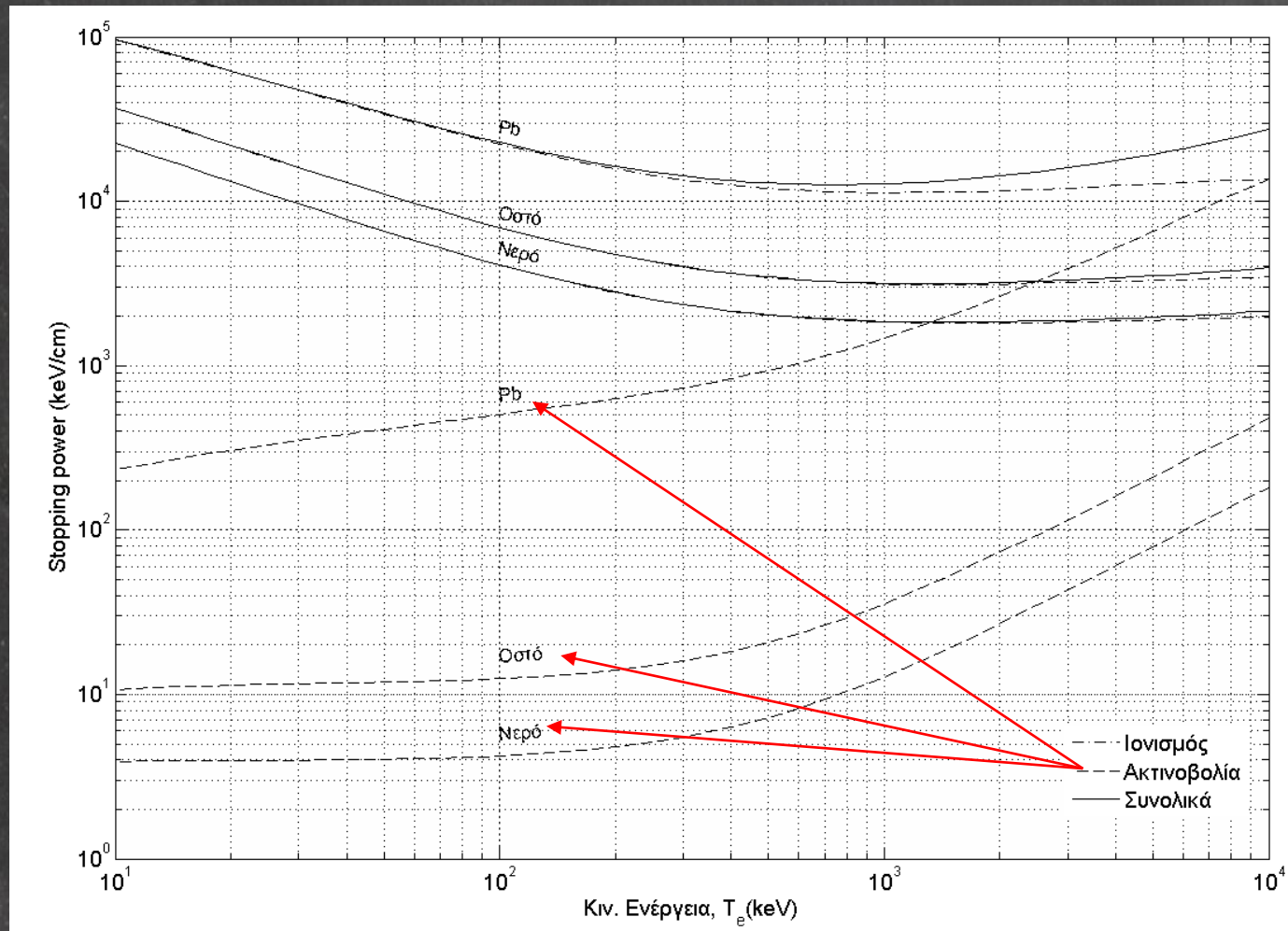
Και για βιολογικά υλικά: Απώλεια ενέργειας e^- λόγω διεγέρσεων & ιονισμών



Απώλεια ενέργειας φορτισμένων σωματιδίων λόγω εκπομπής ακτινοβολίας

Από ποιους παράγοντες εξαρτάται η απώλεια ενέργειας ανά μονάδα διαδρομής ή ανασχετική ισχύς ενός υλικού ???

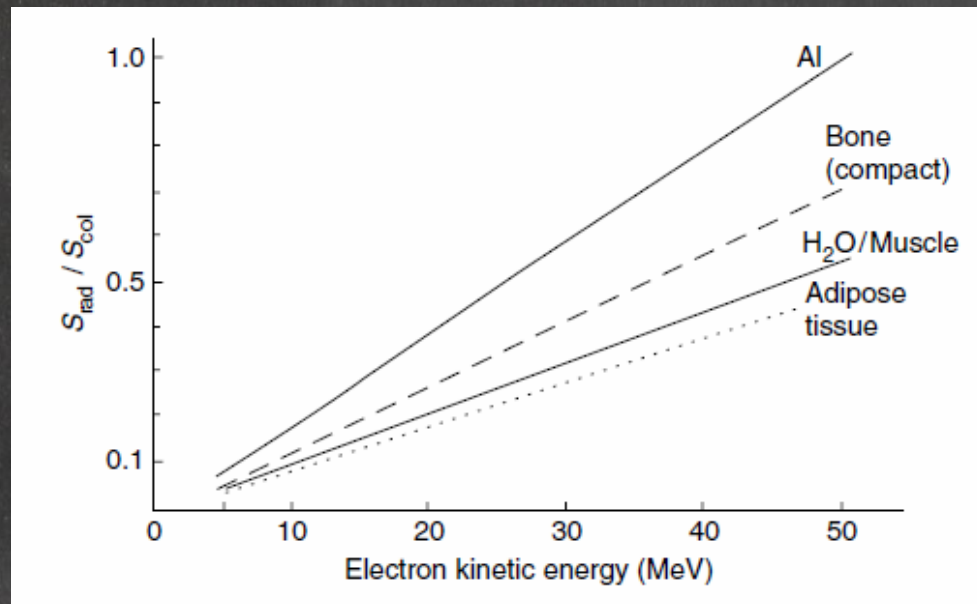
$$\frac{dE}{dx_{rad}} \propto \rho \frac{N_A}{AB}, \frac{Z^2}{m^2}, E$$



Κλάσμα ακτινοβολίας (radiation Yield), $\Upsilon(E_0)$

Το ποσοστό της αρχικής κινητικής ενέργειας των φορτισμένων σωματιδίων, E_0 , που θα μετατραπεί σε ακτινοβολία πέδησης:

$$\Upsilon(E_0) = \frac{1}{E_0} \int_0^{E_0} \frac{S_{\text{rad}}(E)}{S_{\text{col}}(E) + S_{\text{rad}}(E)} dE$$



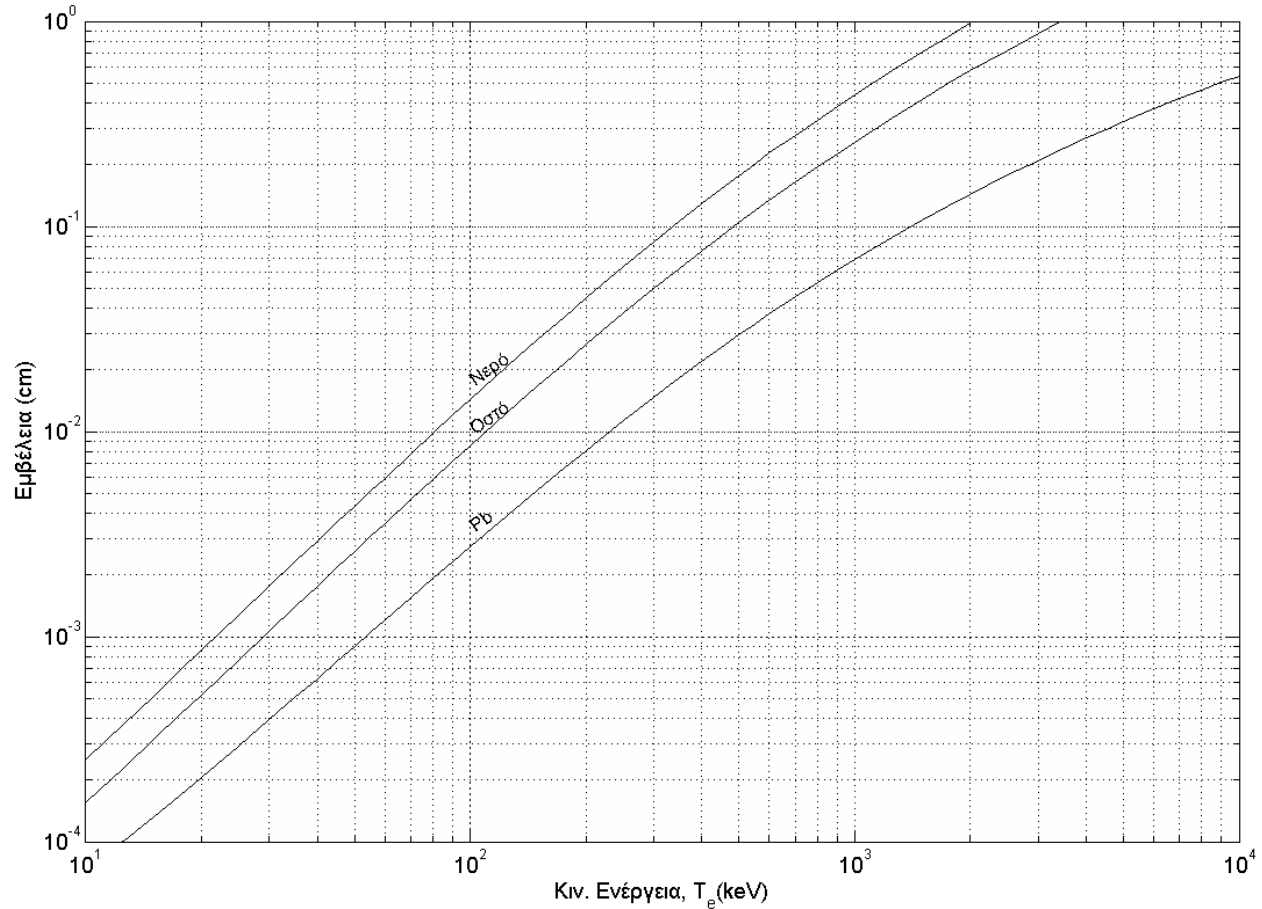
Continuous Slowing Down Approximation (CSDA) και εμβέλεια

Αν υποθέσουμε ότι όλα τα φορτισμένα σωματίδια μιας δέσμης θα χάνουν ανά μονάδα διαδρομής το ίδιο ποσό ενέργειας, ίσο με την ανασχετική ισχύ του υλικού για την εκάστοτε ενέργειά τους, η εμβέλειά τους, r_0 , θα δίνεται ως:

$$r_0 = \int_0^{E_0} \frac{1}{S_{\text{tot}}(E)} dE$$

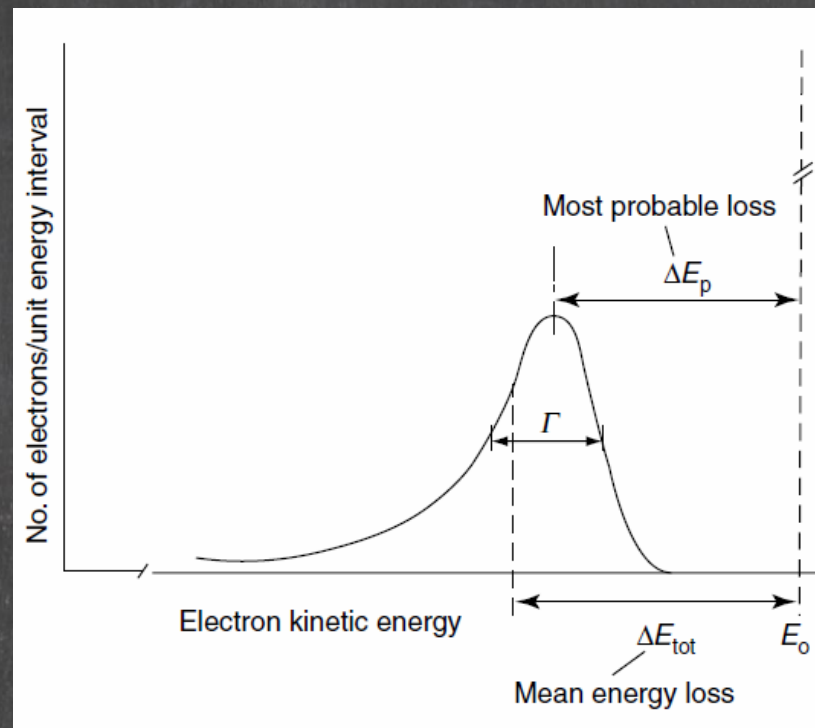
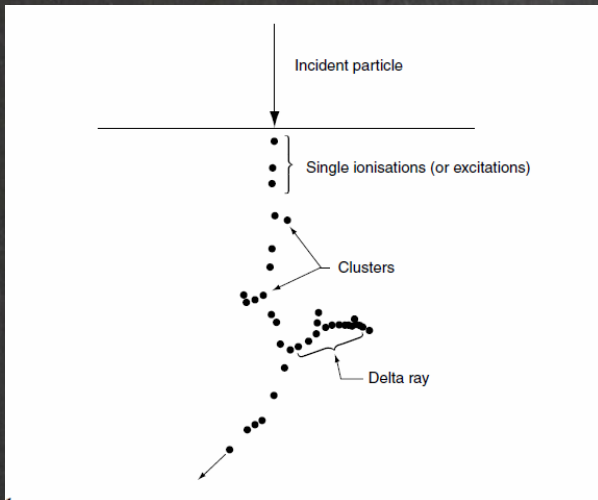
Πρακτικά η εμβέλεια των φορτισμένων σωματιδίων μπορεί να διαφοροποιείται λόγω διασποράς στην απώλεια ενέργειας (**energy straggling**) και της σχετικής σημασίας των **ελαστικών σκεδάσεων**

Εμβέλεια ηλεκτρονίων σε διάφορα υλικά



Energy straggling ...

Το εύρος της κατανομής απώλειας ενέργειας των σωματιδίων επηρεάζεται από τις, μικρής πιθανότητας, αλληλεπιδράσεις με μεγάλη απώλεια ενέργειας (πέδηση, ιονισμοί με μεγάλη μεταφορά ενέργειας)



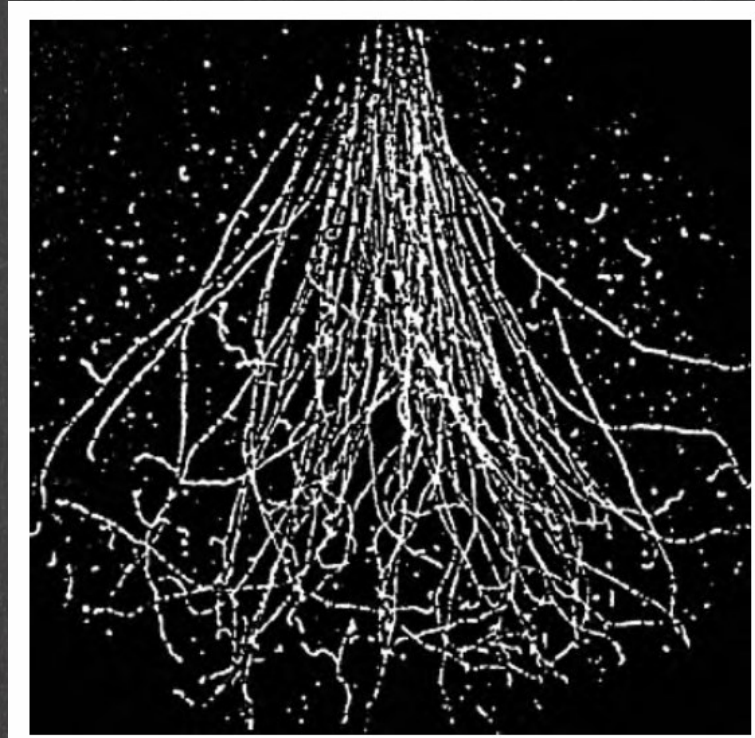
Δοσιμετρία φορτισμένων σωματιδίων

$$D_m \stackrel{\delta\text{-eqm}}{=} \Phi \left(\frac{S_{\text{col}}}{\rho} \right)_m$$

$$D_m \stackrel{\delta\text{-eqm}}{=} \int_0^{E_{\text{max}}} \Phi_E \left(\frac{S_{\text{col}}(E)}{\rho} \right)_m dE$$

Ελαστικές σκεδάσεις

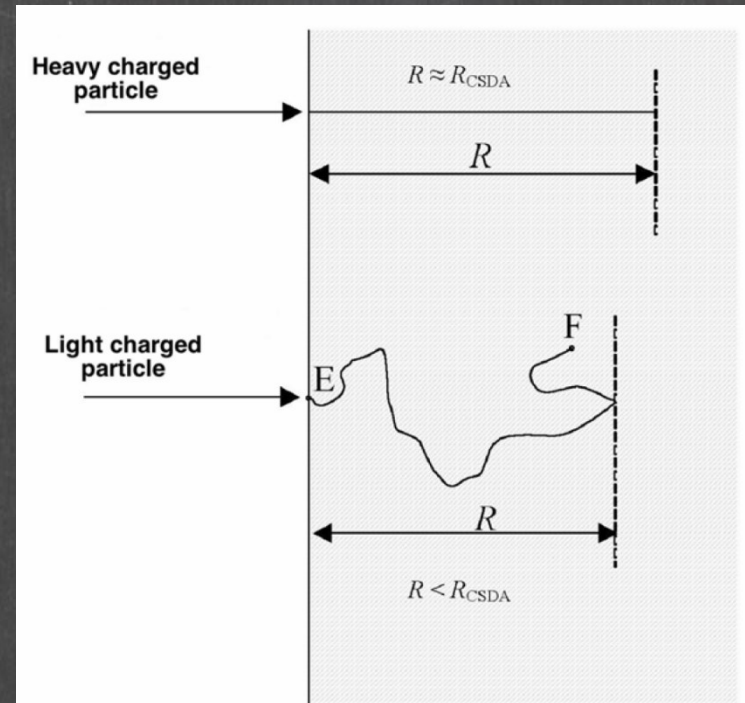
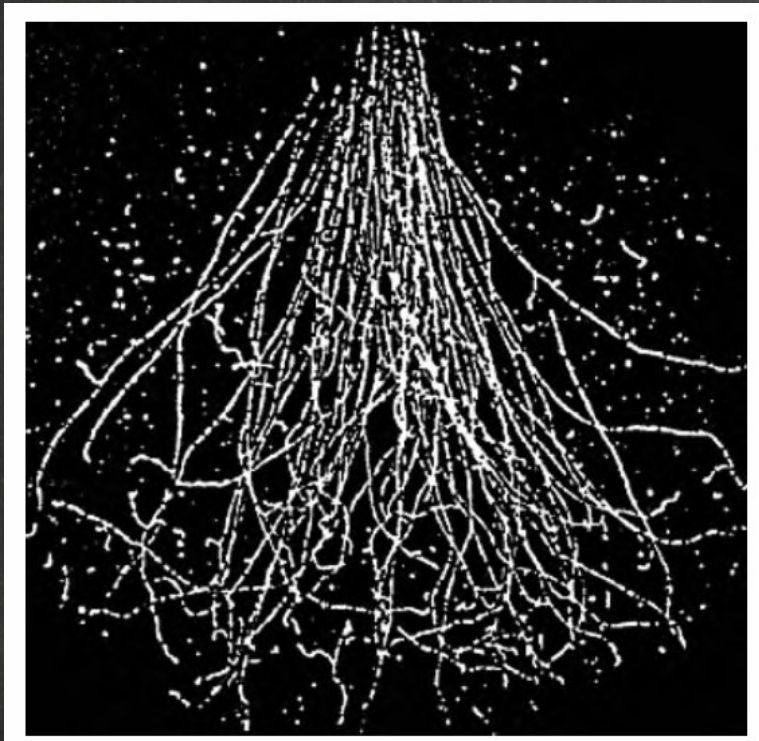
- Σημαντικές για ελαφρά φορτισμένα σωματίδια (e)
- Η μέση γωνία σκέδασης αυξάνει με το Z και τη μείωση της ενέργειας.



e^- 9.3 MeV σε σε θάλαμο
φυσάλιδων προπανίου

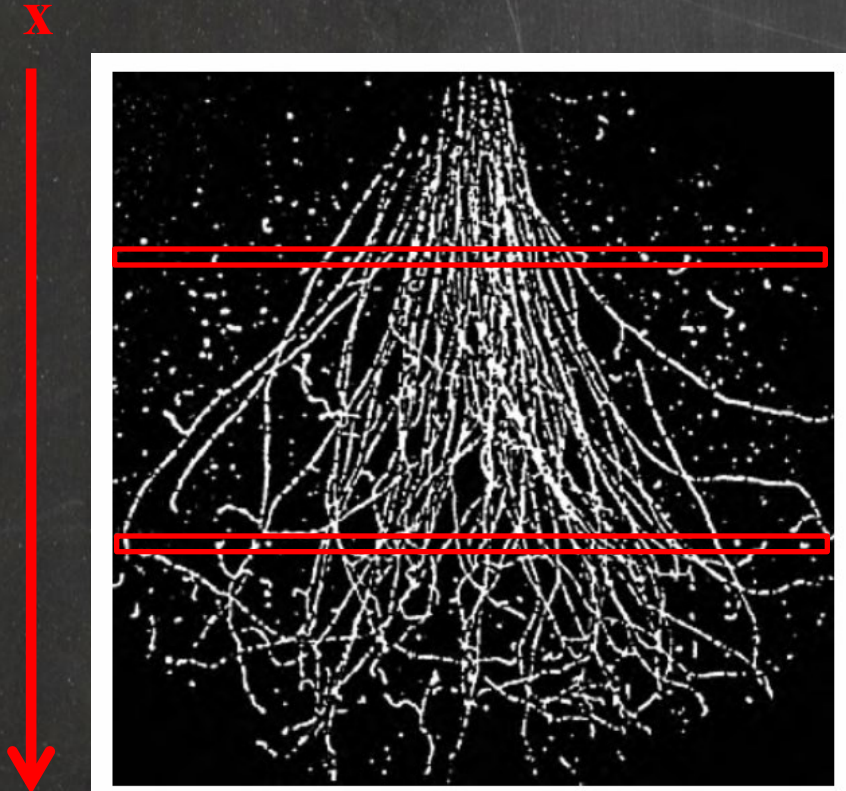
Η σημασία των ελαστικών σκεδάσεων

Το μήκος τροχιάς, το βάθος διείσδυσης και η εμβέλεια (CSDA range) μπορεί να διαφέρουν ...



e^- 9.3 MeV σε σε θάλαμο
φουσαλίδων προπανίου

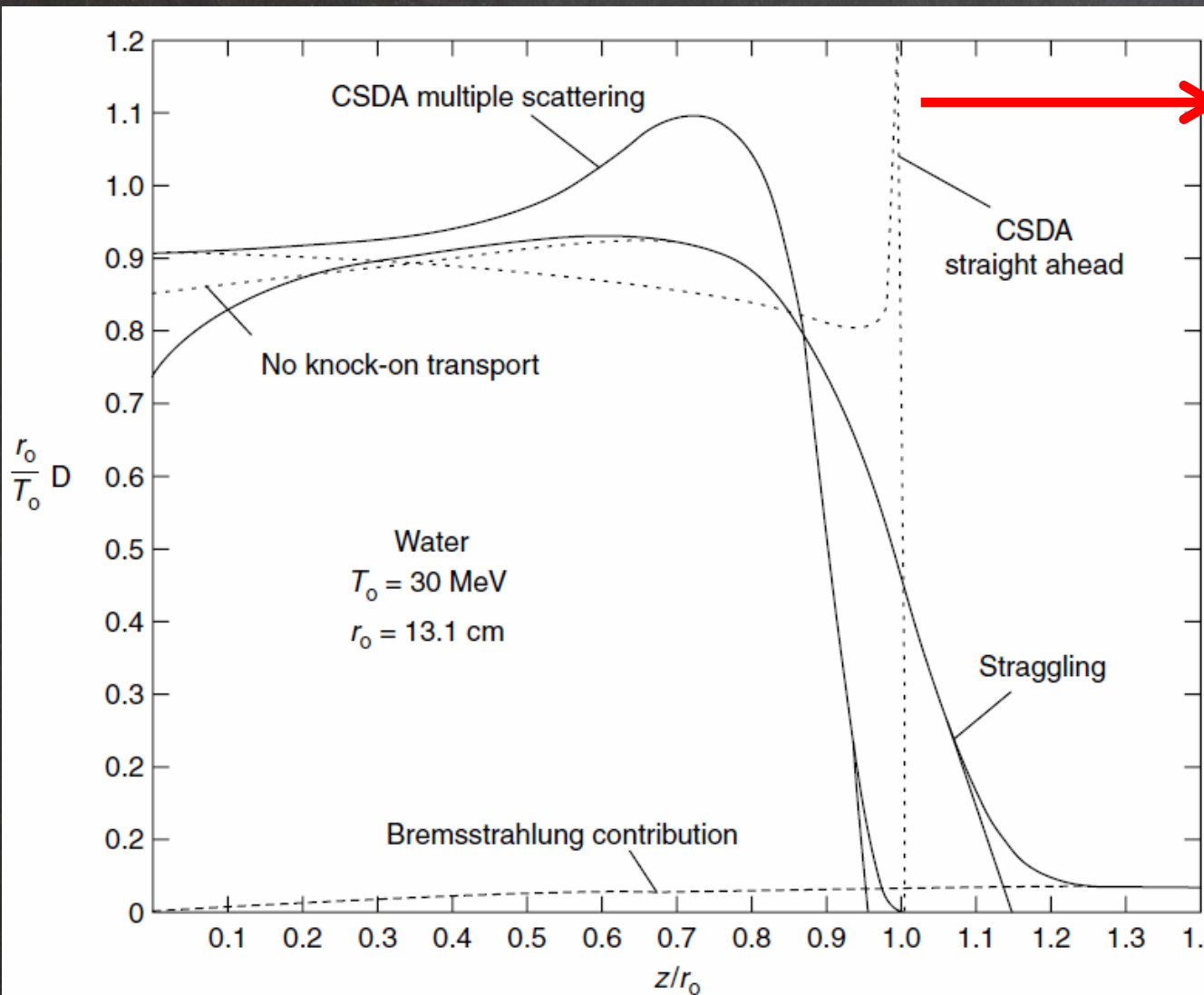
Η σημασία των ελαστικών σκεδάσεων



Για ευρείες δέσμες η καμπύλη δόσης-βάθους αυξάνει μέχρι η μείωση της ροής να οδηγήσει στη ραγδαία μείωση της: η δόση στη στοιχειώδη μάζα μεταξύ x και $x+dx$ θα είναι μικρότερη σε βάθος x_1 από ότι σε x_2 για $x_1 < x_2 < 0,7$ της εμβέλειας

e^- 9.3 MeV σε σε θάλαμο
φουσαλίδων προπανίου

Καμπύλη δόσης-βάθους φορτισμένων σωματιδίων

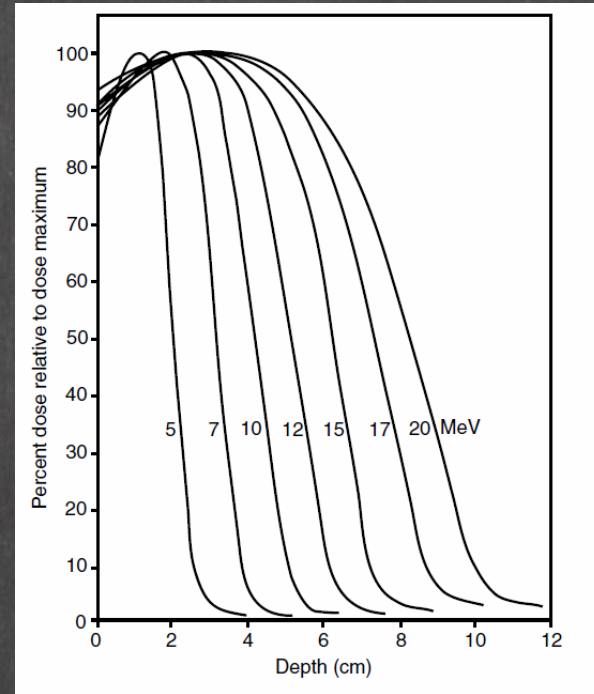
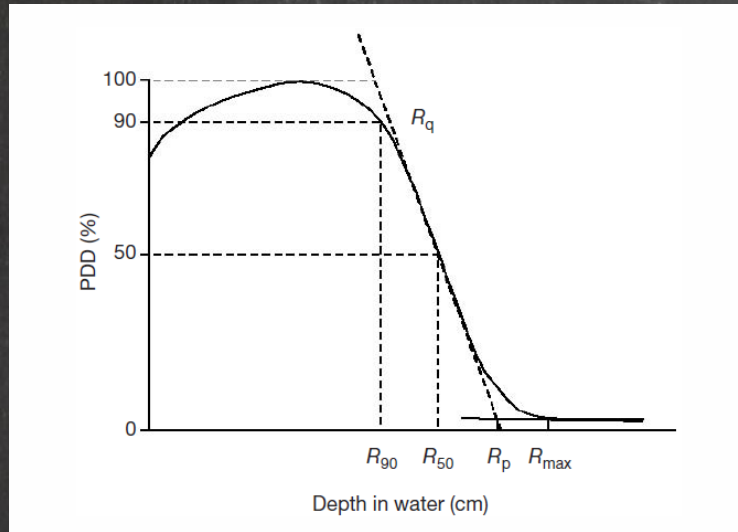


Καμπύλη Bragg

Παρατηρείται μόνο για βαρέα φορτισμένα σωματίδια

e^- 30 MeV σε νερό

Καμπύλες δόσης-βάθους e^-



$$\{2,3,4,5\} \times E_0 \text{ [MeV]} \\ = \\ \{R_{100\%}, R_{90\%}, R_{50\%}, R_p\} \text{ [mm]}$$

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