

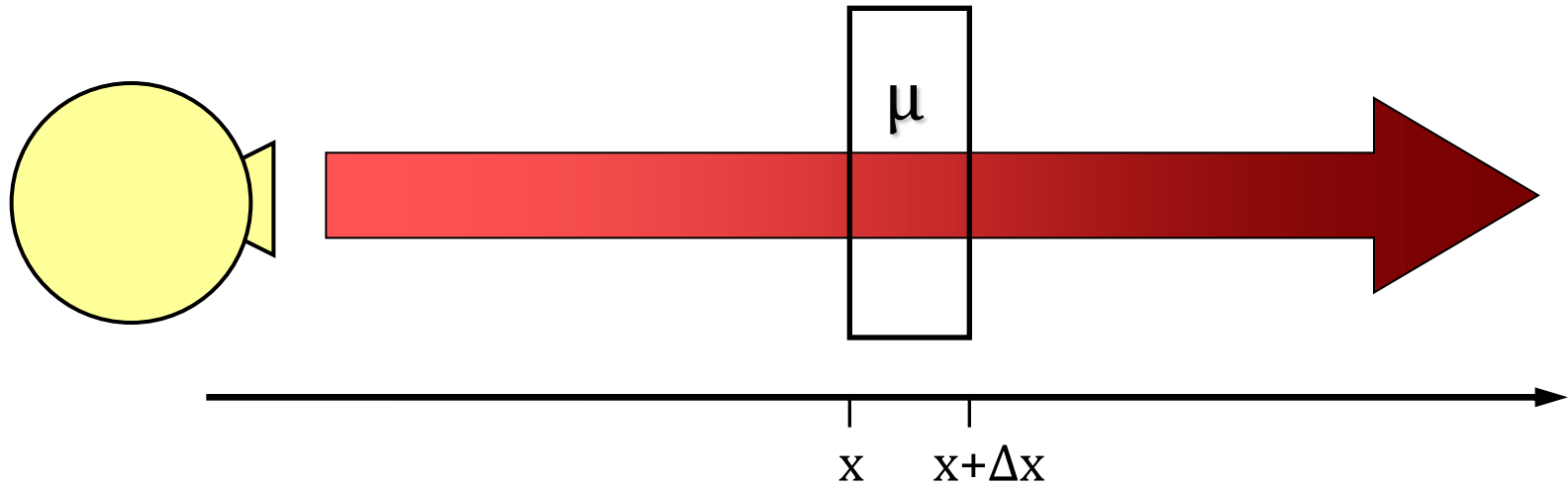
ΙΑΤΡΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Π. Παπαγιάννης & Ε. Στυλιάρης
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΝ ΑΘΗΝΩΝ
2024 - 2025

ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΦΩΤΟΝΙΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΥΛΗ

- Χαρακτηριστικές Ενέργειες & Μήκη Κύματος
- Απορρόφηση Ακτινοβολίας
 - Εκθετικός Νόμος Απορρόφησης
 - Γραμμικός Συντελεστής Απορρόφησης μ
- Βασικές Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις
 - Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο
 - Φαινόμενο Compton, Κινηματική
 - Δίδυμη Γένεση
- Εξάρτηση του Συντελεστή Απορρόφησης μ από την Ενέργεια και το Υλικό

ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ



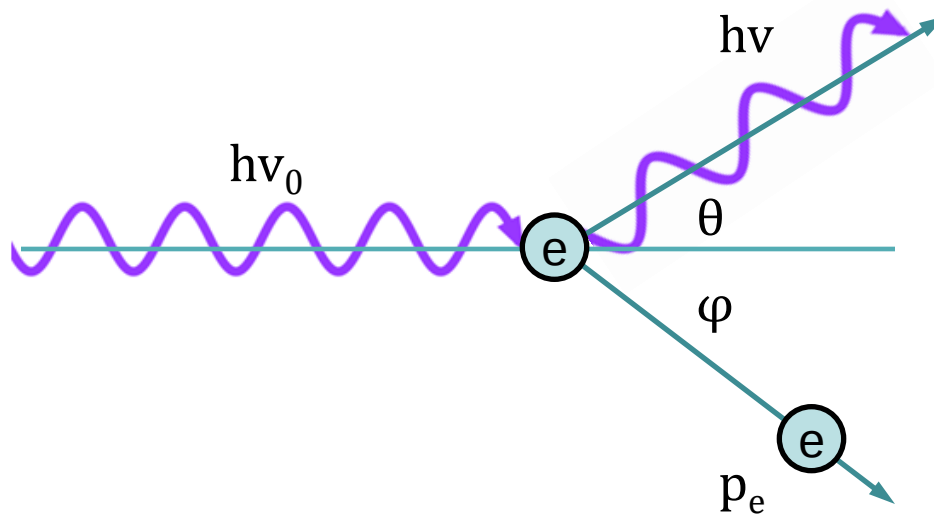
$$\frac{dI}{I(x)} = -\mu dx \Rightarrow \int \frac{dI}{I(x)} = -\mu \int dx \Rightarrow I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

μ : γραμμικός συντελεστής απορρόφησης

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ Compton

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

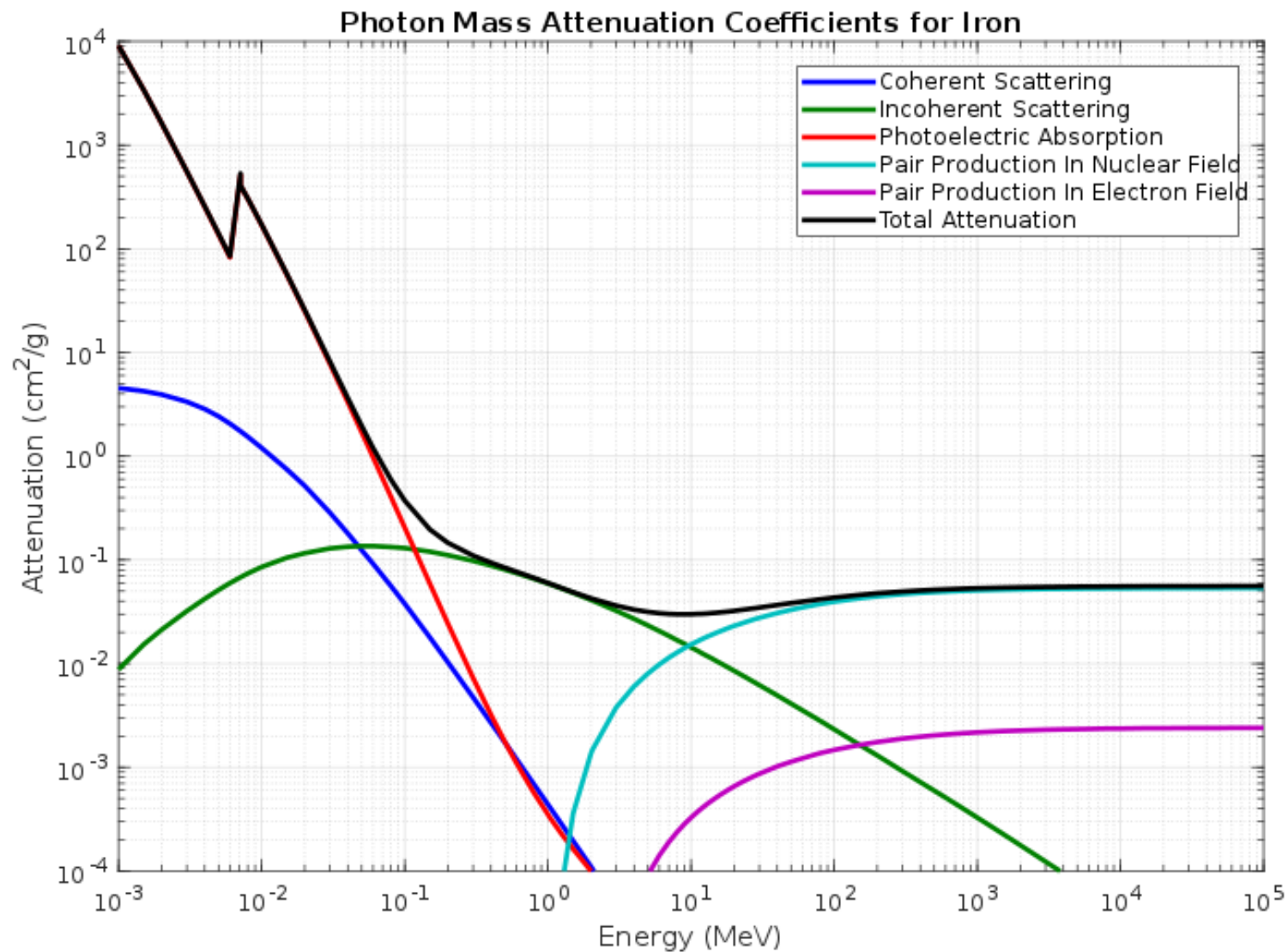
Φωτόνιο: $E = pc$



Διατήρηση Ορμής

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{h\nu_0}{c} = \frac{h\nu}{c} \cos\theta + p_e \cos\varphi \\ 0 = \frac{h\nu}{c} \sin\theta - p_e \sin\varphi \end{array} \right\} \Rightarrow p_e^2 c^2 = (h\nu_0)^2 + (h\nu)^2 - 2(h\nu_0)(h\nu) \cos\theta$$

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ



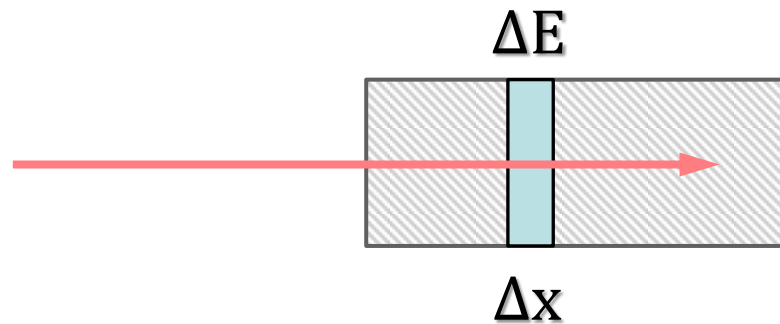
ΙΑΤΡΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Π. Παπαγιάννης & Ε. Στυλιάρης
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΝ ΑΘΗΝΩΝ
2019 - 2020

ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΦΟΡΤΙΣΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΥΛΗ

- Γραμμική Ανασχετική Ισχύς (Linear Stopping Power)
 - Απώλεια Ενέργειας Φορτισμένου Σωματιδίου
 - Ο τύπος του Bethe
 - Η καμπύλη Bragg
- Εμβέλεια Φορτισμένου Σωματιδίου
 - Ορισμός της Εμβέλειας R
 - Συσχετισμός του R με το Z και την Ενέργεια
 - Απομένουσα Ενέργεια μετά από Διέλευση Υλικού
- Παραμετροποίηση της Ανασχετικής Ισχύος για διάφορα Υλικά

ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΣΧΕΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ



Το φορτισμένο σωματίδιο χάνει ενέργεια ΔE στο διάστημα Δx

Ορισμός της γραμμικής ανασχετικής ισχύος:

$$S = - \frac{dE}{dx}$$

Linear Stopping Power S

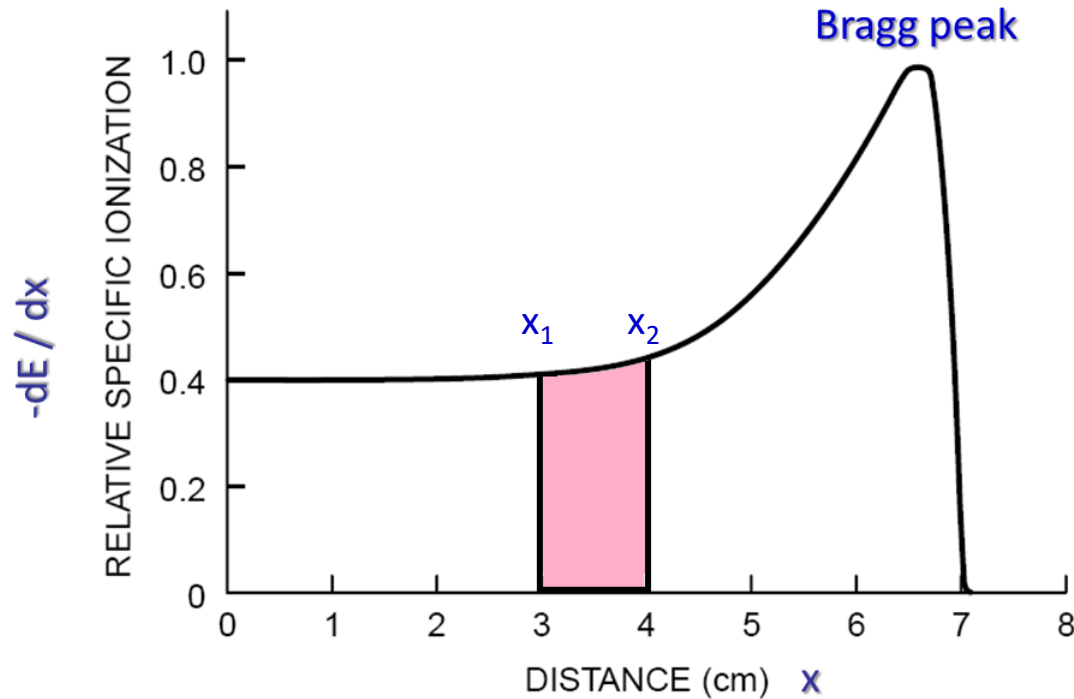
$$S = S(z, E, Z)$$

Το S εξαρτάται κυρίως από:

- Τον ατομικό αριθμό z και την ενέργεια E του εισερχόμενου σωματιδίου
- Τον ατομικό αριθμό Z του στόχου

ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΣΧΕΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ

Χαρακτηριστικά της καμπύλης Bragg

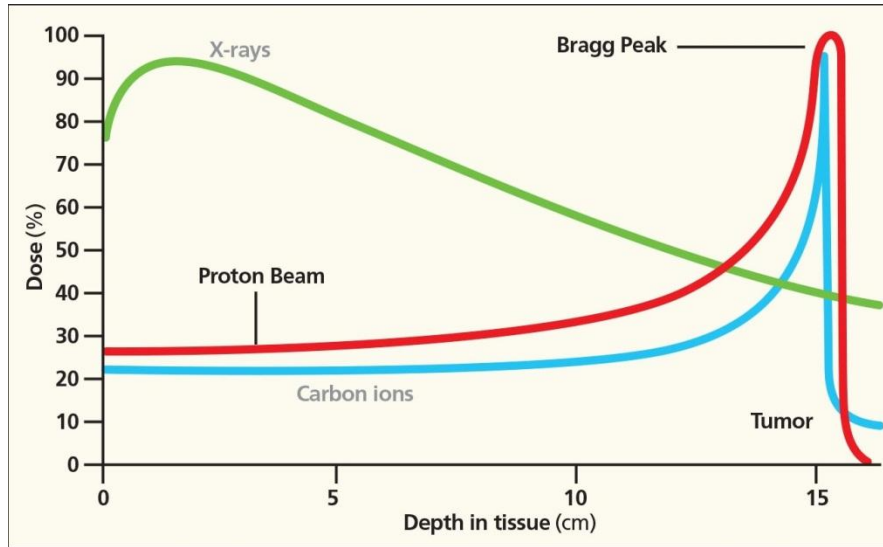


$$E_{1 \rightarrow 2} = \int_1^2 - \frac{dE}{dx} dx$$

Η αρχική ενέργεια E_0 του ιοντίζοντος σωματίου ταυτίζεται με το **εμβαδόν** της καμπύλης Bragg.

ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΣΧΕΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ

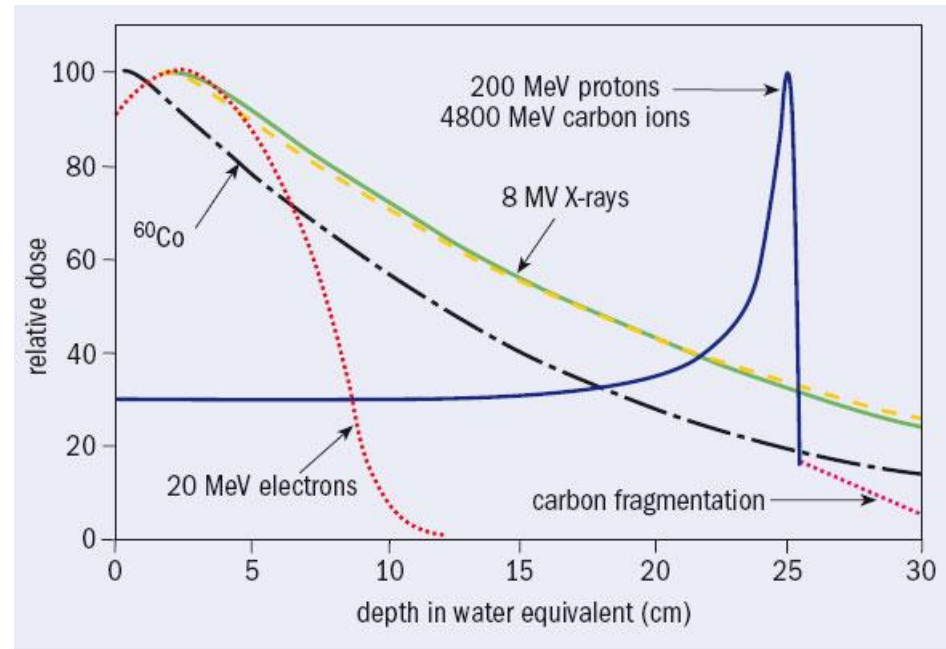
Χαρακτηριστικά της καμπύλης Bragg



Σύγκριση της καμπύλης Bragg ισοδύναμης ενεργειακά (ίδια εμβέλεια) δέσμης πρωτονίων και ιόντων άνθρακα ^{12}C .

Διαφορετική συμπεριφορά της καμπύλης Bragg για διαφορετικά ιόντα ισοδύναμης ενέργειας και φορτίου.

Σύγκριση της καμπύλης Bragg για ισοδύναμα ιόντα ^{12}C (4800 MeV) & πρωτόνια p (200 MeV) με την αντίστοιχη απορρόφηση ηλεκτρονίων και φωτονίων.



ΙΑΤΡΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Π. Παπαγιάννης & Ε. Στυλιάρης
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΝ ΑΘΗΝΩΝ
2019 - 2020

ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΜΕ ΑΚΤΙΝΕΣ-X

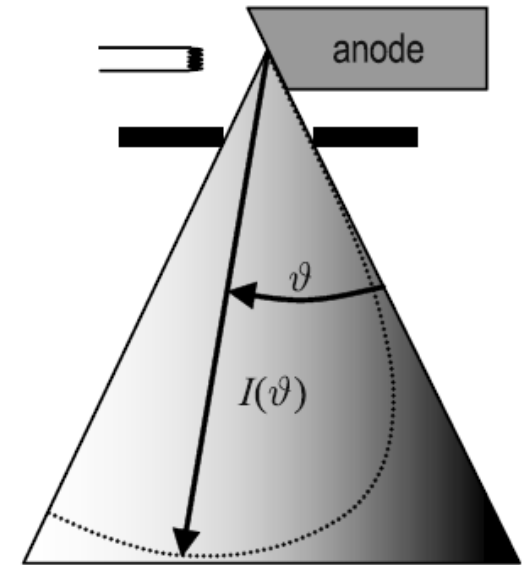
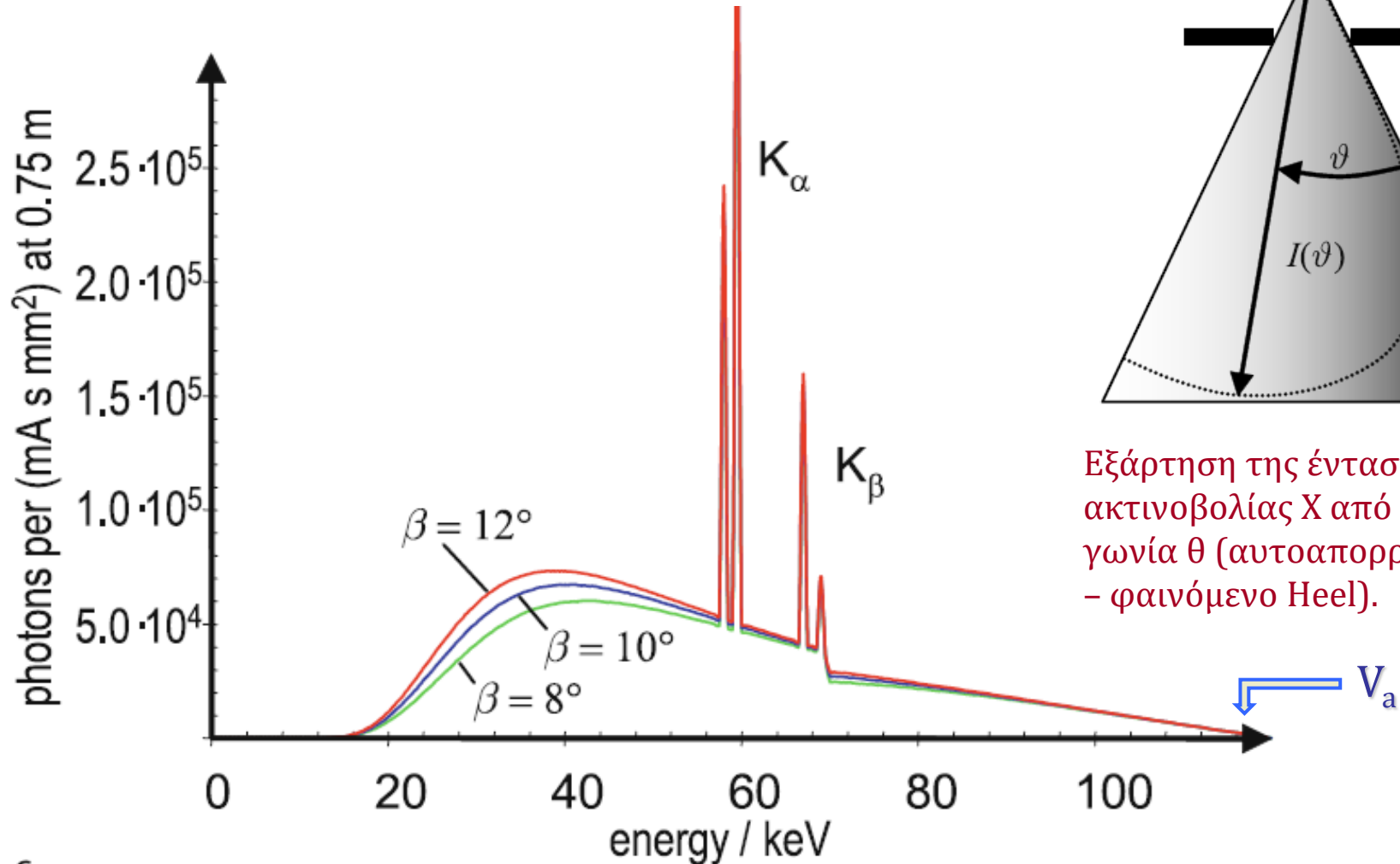
- Αρχή Λειτουργίας – Παραγωγή Ακτίνων X
- Απορρόφηση Ακτίνων X, Ανίχνευση Ακτίνων X
- Κλινικές Συσκευές Ακτίνων X – Διάγνωση - Αρχή της Μαστογραφίας
- Αριθμός CT (Hounsfield Number)
- Η μέθοδος της Διπλής Ενέργειας

ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ

- Computed X-Ray Tomography: Αρχή Λειτουργίας
- Ημιτονόγραμμα (Sinogram) – Ανακατασκευή Τομογραφικής Εικόνας
- Radon Transform
- Επαναληπτικές Μέθοδοι Ανακατασκευής (ART)

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ

Τυπικό φάσμα ακτίνων Χ από άνοδο Βολφραμίου (W)
σε ανοδική τάση $V_a = 120$ kV.

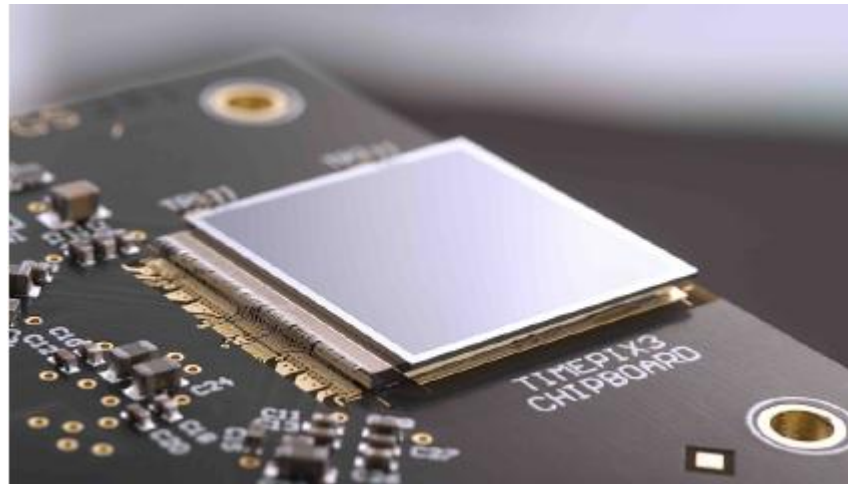


Εξάρτηση της έντασης της
ακτινοβολίας Χ από τη
γωνία θ (αυτοαπορρόφηση
- φαινόμενο Heel).

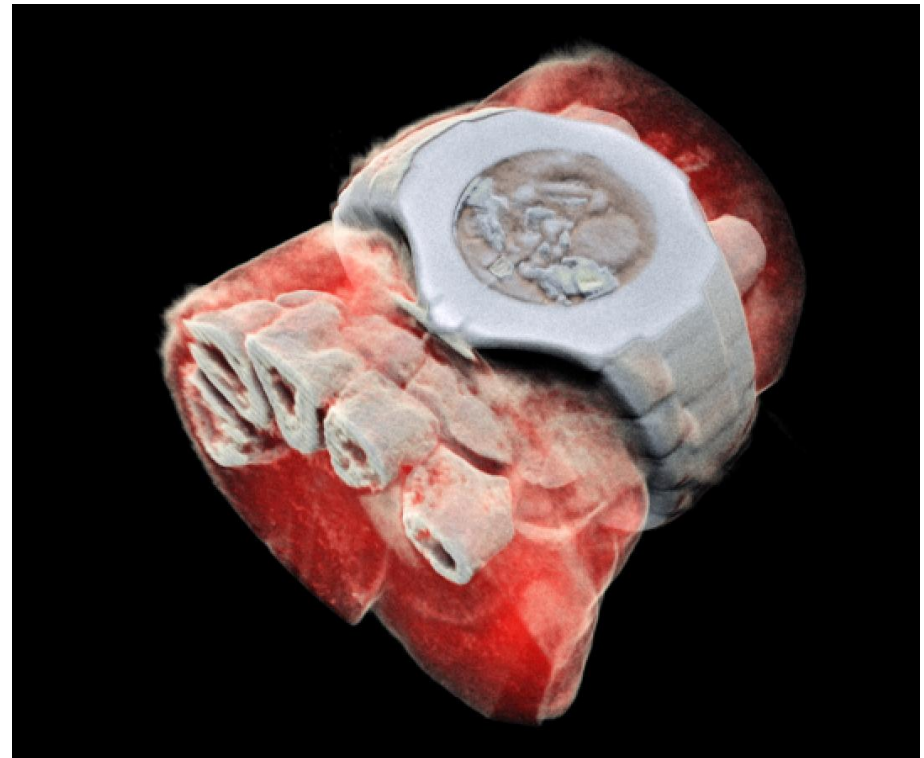
ANIXNEYΣH AKTINΩN X

Medipix Technology @ CERN

Online Color X-ray Computed Tomography



First 3D color X-ray of a human



A 3D image of a wrist with a watch showing part of the finger bones in white and soft tissue in red.

(Image: MARS Bioimaging Ltd)

ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ



X-Ray System with Flat Panel Detector



C-Arm X-tube with Flat Panel Detector

ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΜΕ ΑΚΤΙΝΕΣ Χ



Διπλό κάταγμα κάτω γνάθου με έντονη μετατόπιση προς τα αριστερά.



Αδιαφάνεια με αιχμηρά σύνορα στον δεξιό μαστό με ιστολογικά ελεγμένο καρκίνωμα.

ΙΑΤΡΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

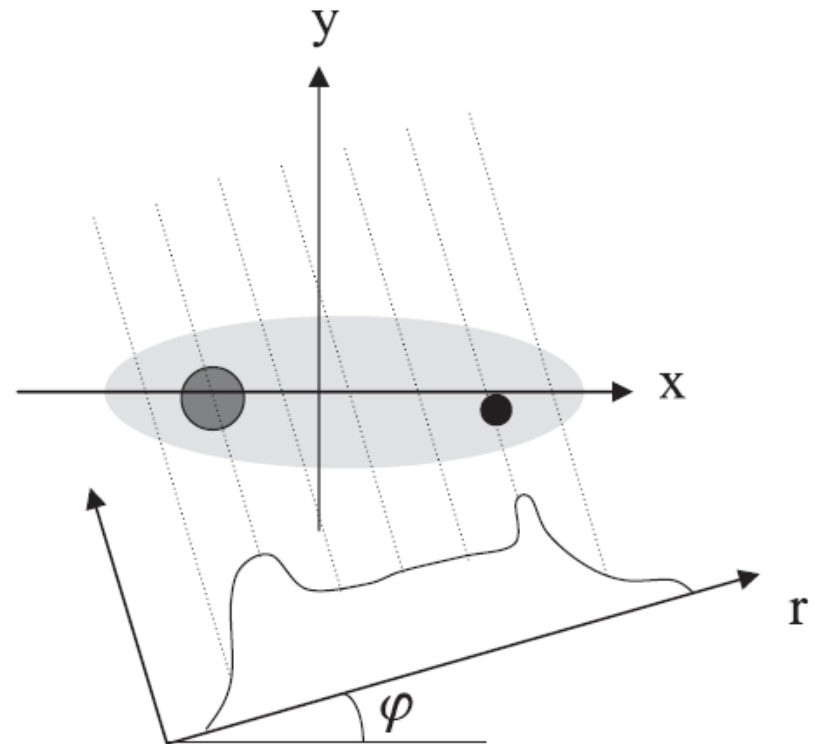
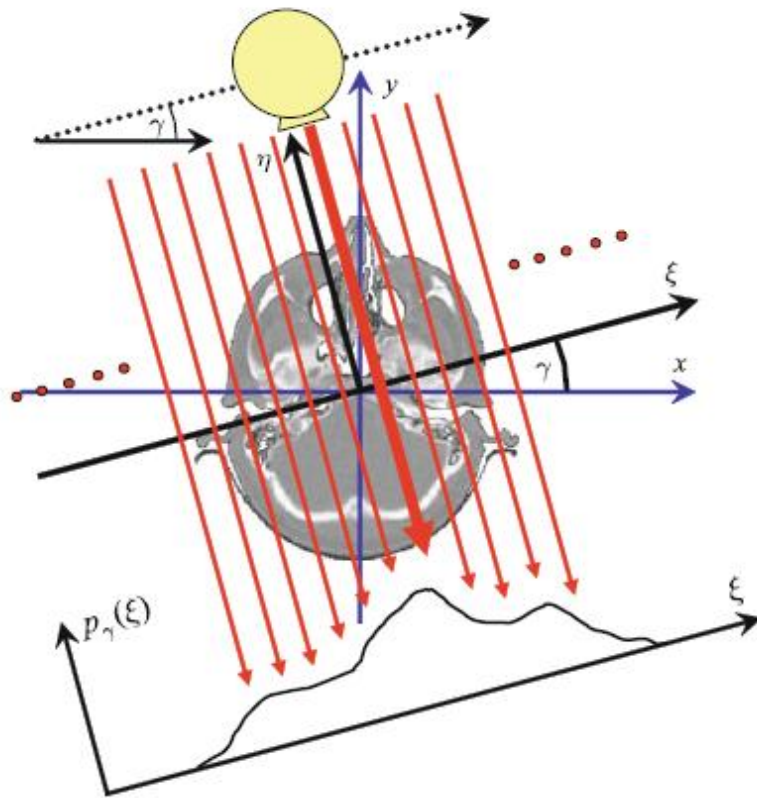
Π. Παπαγιάννης & Ε. Στυλιάρης
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΝ ΑΘΗΝΩΝ
2019 - 2020

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

- Ο Προβολικός Πίνακας
- Μέθοδος της Οπισθοπροβολής (Backprojection)
- Αντιστροφή με τη Μέθοδο Fourier
- Η Τομογραφική Ανακατασκευή σαν Γραμμικό Πρόβλημα
- Επαναληπτικές Μέθοδοι Ανακατασκευής Τομογραφικής Εικόνας
- Η Αλγεβρική Μέθοδος Ανακατασκευής - Algebraic Reconstruction Technique (ART)

COMPUTED TOMOGRAPHY

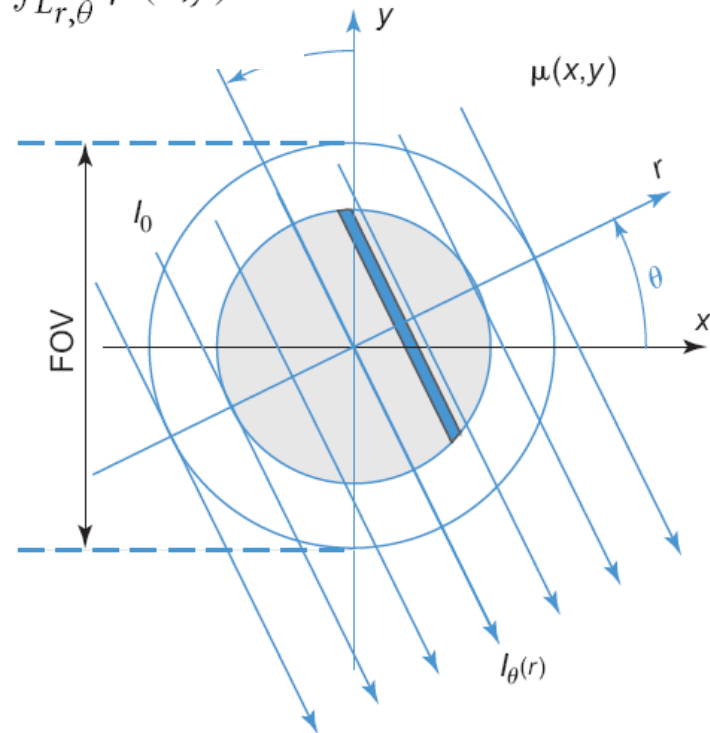
Τομογραφική Ανακατασκευή Εικόνας από Προβολικά Δεδομένα



COMPUTED TOMOGRAPHY

The Sinogram

$$I_{\theta}(r) = I_0 \cdot e^{-\int_{L_{r,\theta}} \mu(x,y) ds}$$



The usual solution: **Inverse Radon Transform**

$$p(r, \theta) = \mathcal{R}\{f(x, y)\}$$

$$r \int_{-\infty}^{\infty} f(r \cdot \cos \theta - s \cdot \sin \theta, r \cdot \sin \theta + s \cdot \cos \theta) ds.$$

Sinogram

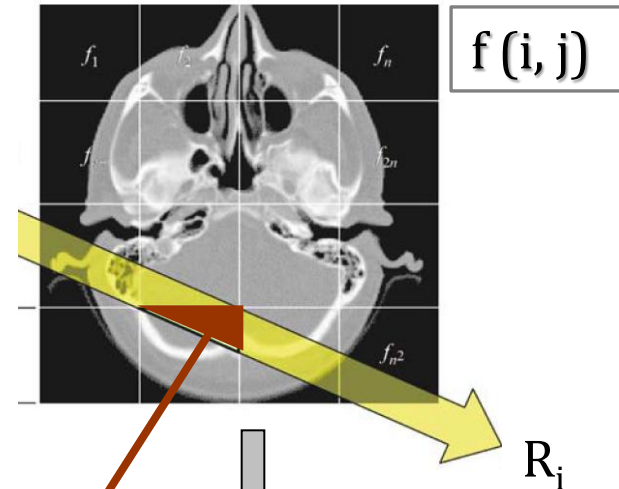
ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

Τομογραφία σαν Γραμμικό Πρόβλημα Πινάκων

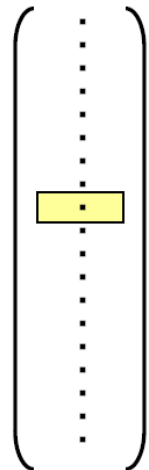
$$S = P \times Q$$

NP: Number of Projections (Angles)

NR: Number of Rays

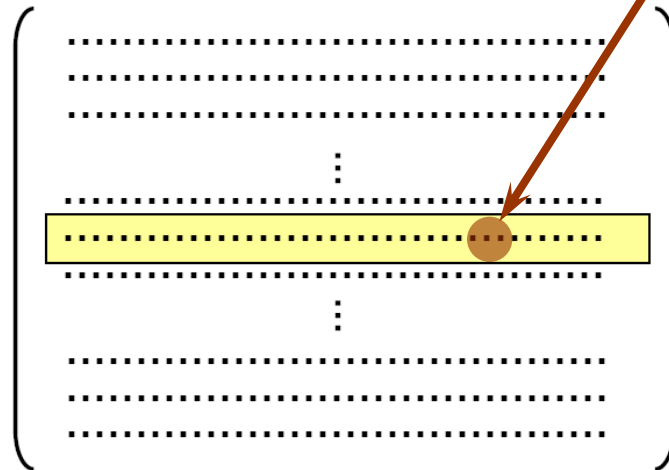


$S(NP \times NR)$



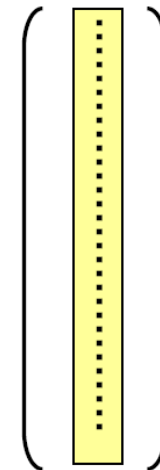
Sinogram

$P(NP \times NR, N^2)$



Projection Matrix

$Q(N^2)$



$f(i, j)$

ΙΑΤΡΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Π. Παπαγιάννης & Ε. Στυλιάρης
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΝ ΑΘΗΝΩΝ
2019 - 2020

Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT)

- Αρχή Λειτουργίας της γ -Camera
- Ιδιότητες του Κατευθυντήρα (Διαπερατότητα, PSF)
- Προβολικές Λήψεις, Ανακατασκευή Τομογραφικής Εικόνας

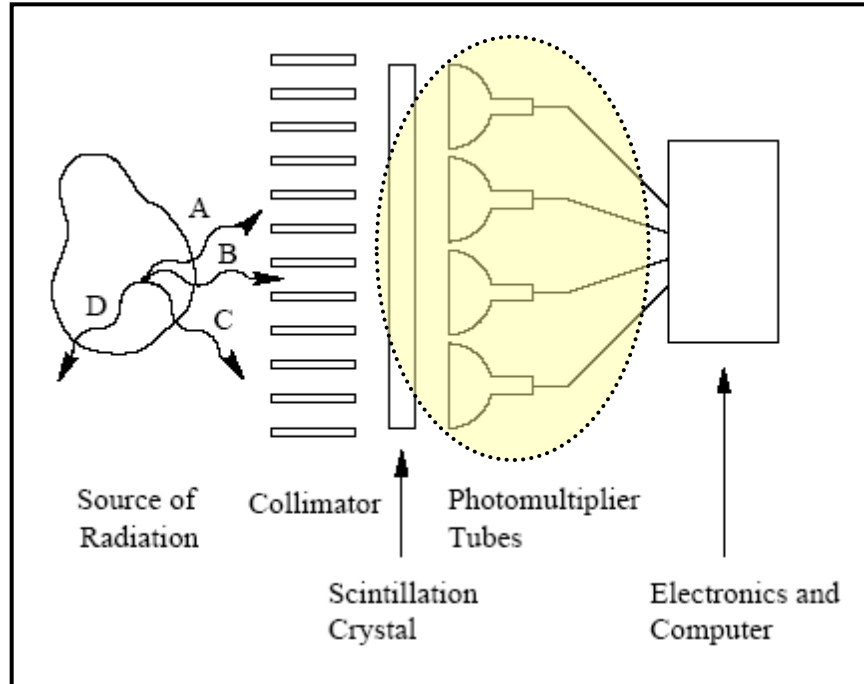
Positron Emission Tomography (PET)

- Αρχή Λειτουργίας, Γεωμετρία Διάταξης
- Ανακατασκευή Τομογραφικής Εικόνας
- Time of Flight (ToF) PET

Ραδιοφάρμακα

Single Photon Emission CT (SPECT)

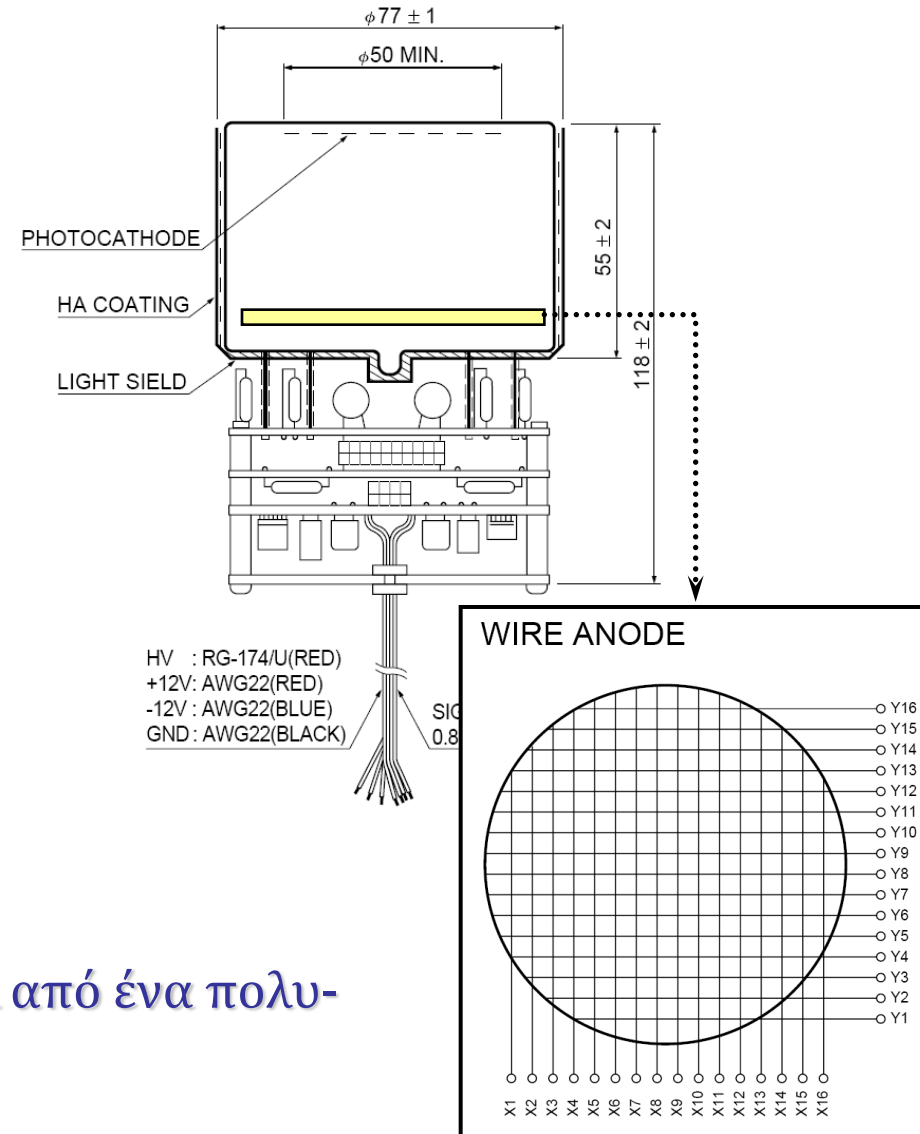
From the Anger Camera to Position Sensitive Photomultiplier Tubes (PSPMTs)



Anger Camera

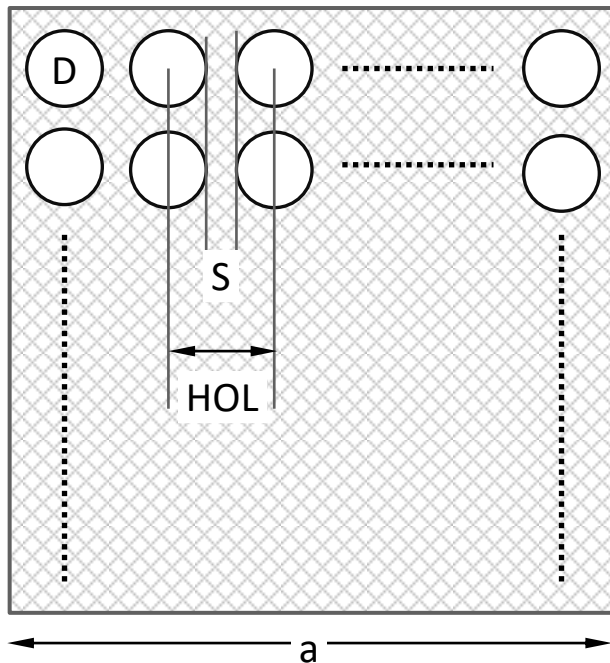
H. Anger: "A new instrument for mapping gamma-ray emitters",
Biol. Med. Quart. Rep. UCRL (1957) 3653

Η συστοιχία των PMTs αντικαθίσταται από ένα πολυ-
ανοδικό πλέγμα.



Single Photon Emission CT (SPECT)

Γεωμετρική Διαπερατότητα (Transmission) Κατευθυντήρα



D: Διάμετρος οπής

S: Διαχωριστική απόσταση (Septum)

HOL: Απόσταση δύο διαδοχικών οπών

Γεωμετρική Διαπερατότητα

Είναι ο λόγος του εμβαδού της επιφάνειας των οπών προς την συνολική μετωπική επιφάνεια του κατευθυντήρα



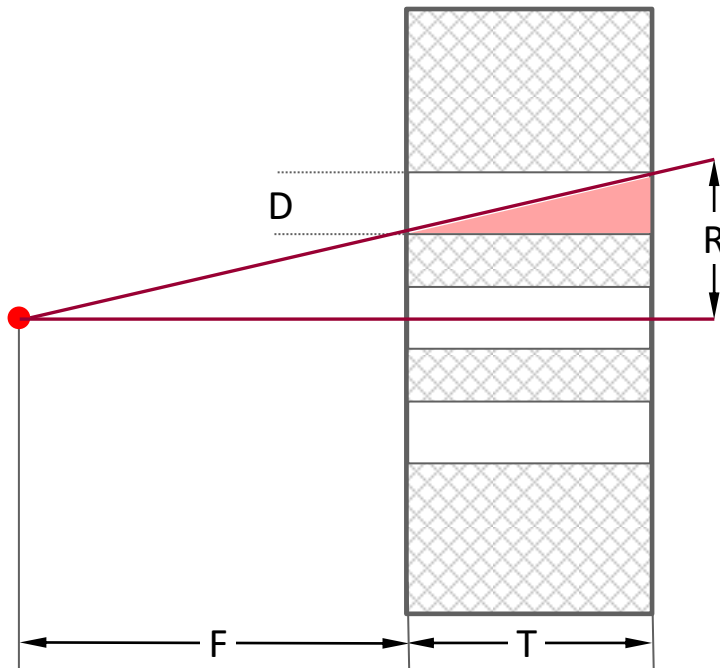
$$T_r = \frac{S_{\text{Holes}}}{S_{\text{Total}}} = \frac{N^2 \cdot \frac{\pi D^2}{4}}{a^2} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{N^2 D^2}{N^2 \cdot \text{HOL}^2}$$



$$T_r = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{D^2}{(D + S)^2}$$

Single Photon Emission CT (SPECT)

Point Spread Function (PSF)

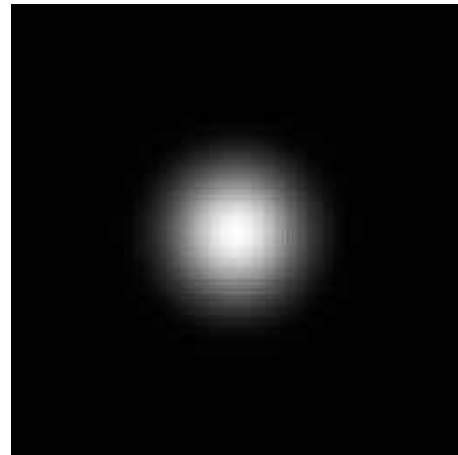


D : Διάμετρος οπής

T : Πάχος κατευθυντήρα

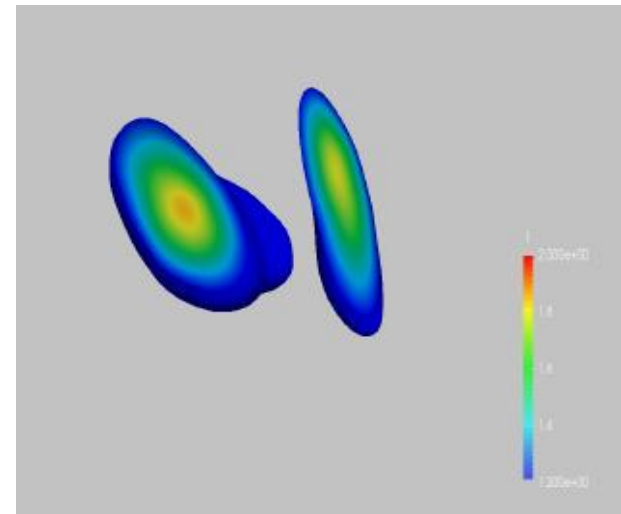
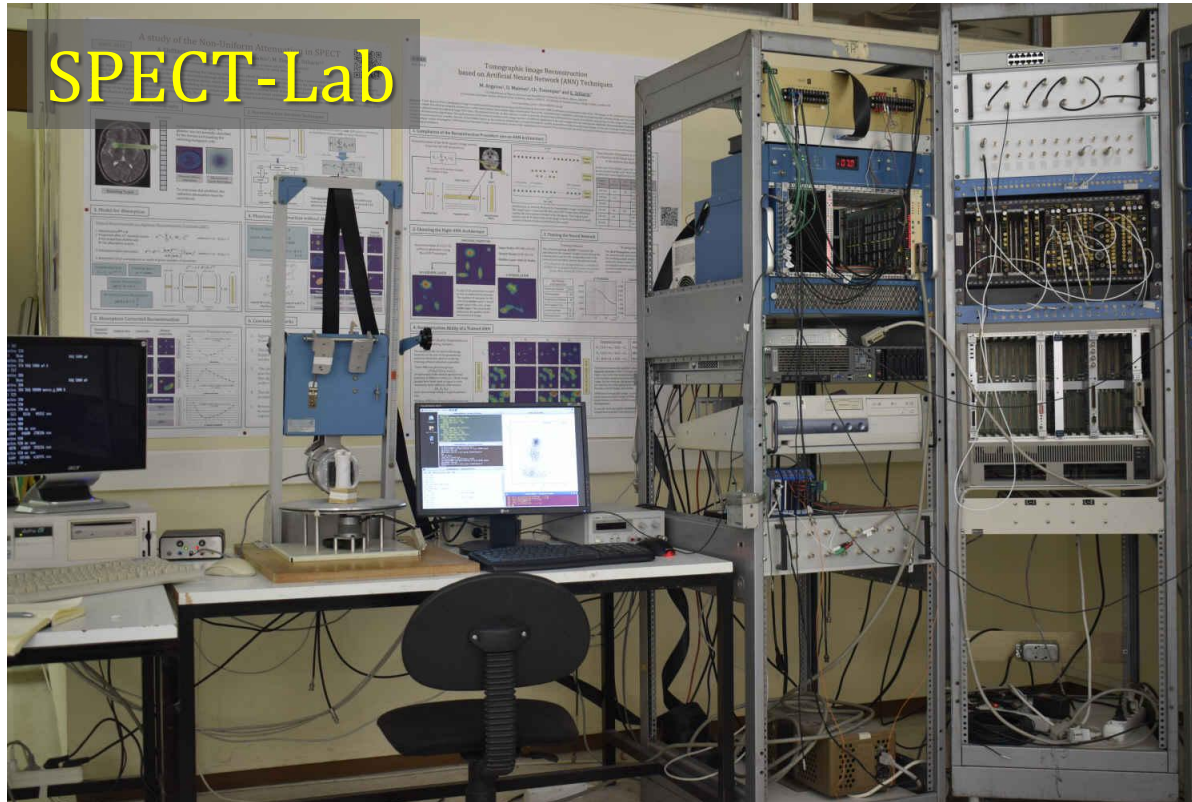
F : Απόσταση σημειακής πηγής από την μετώπη του κατευθυντήρα

Η σημειακή πηγή απεικονίζεται διάχυτα
σαν κύκλος ακτίνας R



$$\frac{R}{F+T} = \frac{D}{T} \Rightarrow R = \frac{D}{T} \cdot (F+T)$$

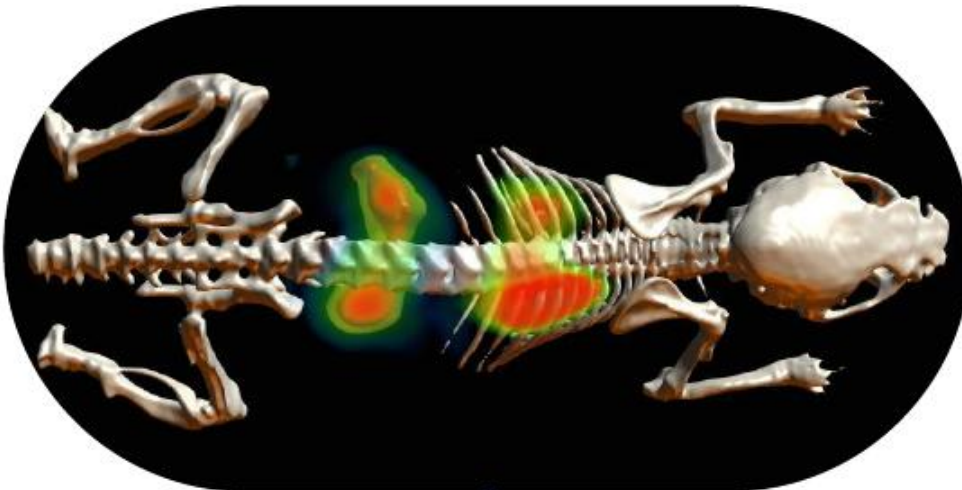
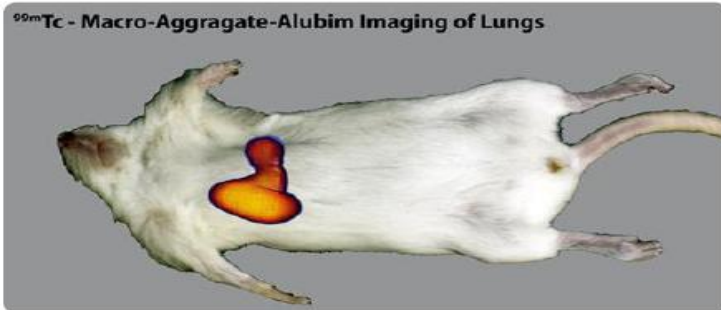
Small Animal SPECT



Techetium-labeled Diethylene-Triamine-Penta-Acetic (^{99m}Tc -**DTPA**) agent was administrated in a small mice and imaged with the high resolution γ -Camera system at SPECT-Lab, Athens, in order to evaluate the function of **kidneys**.

L. Koutsantonis, PhD Thesis (2018) The Cyprus Institute

Small Animal SPECT



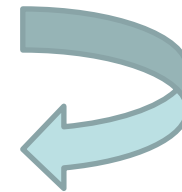
Two ex-vivo studies:

A. Tc^{99m} – Macro Aggregated Albumin (MAA) Imaging:

- Lung perfusion imaging
- Dose: $20 \mu Ci$
- **24** projections in the full angular range
- Imaged 12h post injection

B. Tc^{99m} - Diethylene Triamine Penta Acid (DTPA) Imaging:

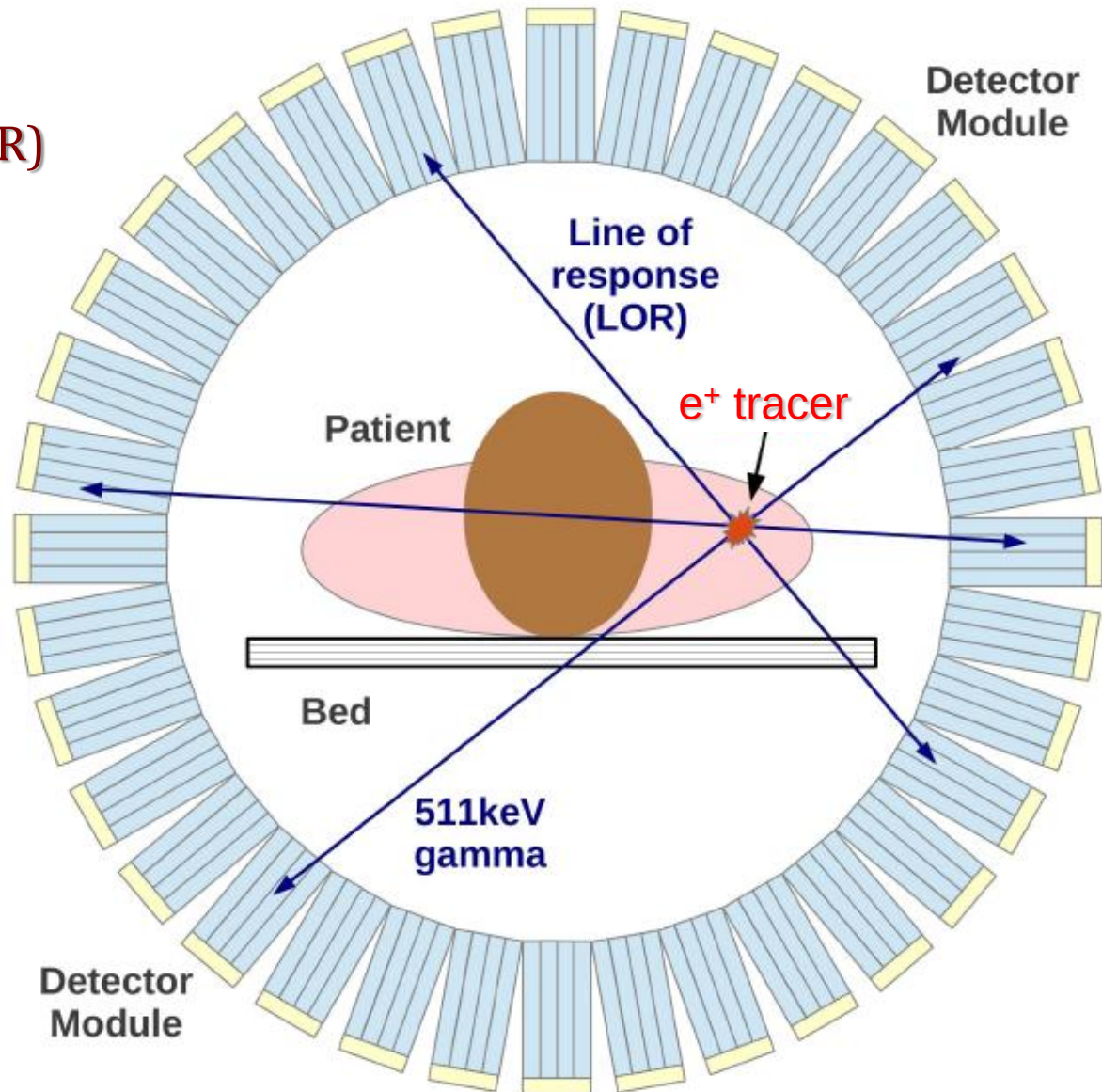
- Kidneys renal functionality
- Dose: $30 \mu Ci$
- **24** projections in the full angular range
- Imaged 2h post injection



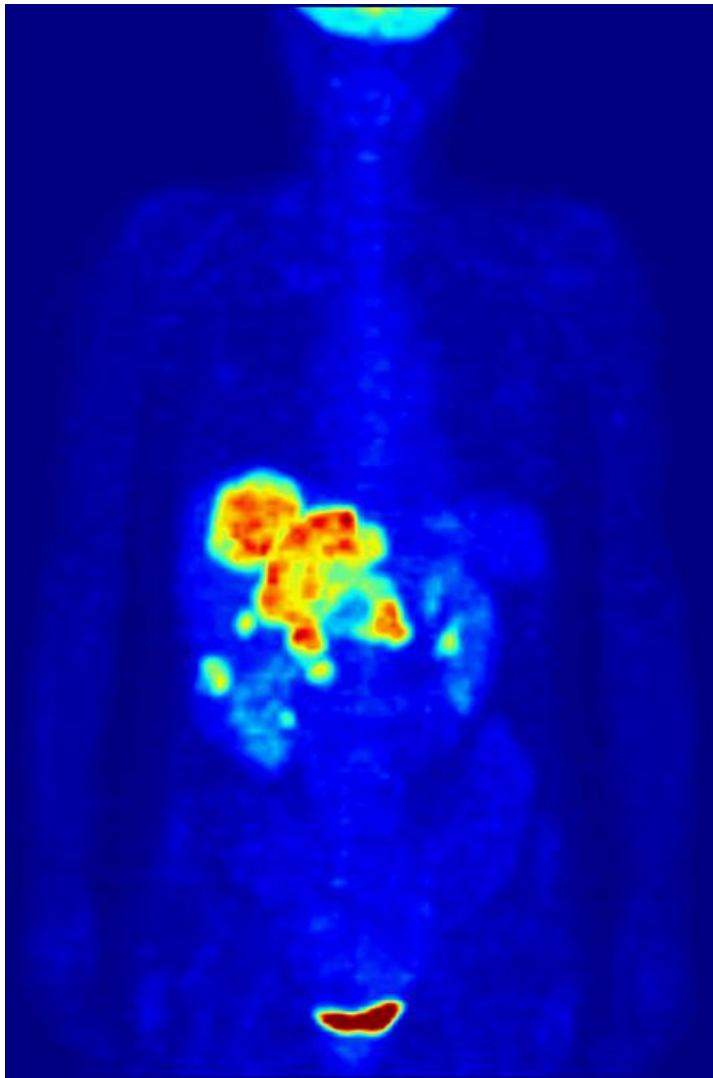
Positron Emission Tomography (PET)

Line of Response (LoR)

Η ευθεία που ενώνει δύο συσχετισμένα στοιχεία του ανιχνευτή όπου έχουν καταγραφεί τα δύο φωτόνια της εξαύλωσης (511keV).



Positron Emission Tomography (PET)



Ολόσωμη απεικόνιση PET με ^{18}F -FDG, όπου διακρίνονται ηπατικές μεταστάσεις του όγκου του παχέος εντέρου.



RatCAP

Μικροσκοπικός τομογράφος PET για εγκεφαλικές απεικονίσεις ποντικού σε εγρήγορση.

C. Woody *et al.*, Brookhaven National Laboratory

ΙΑΤΡΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

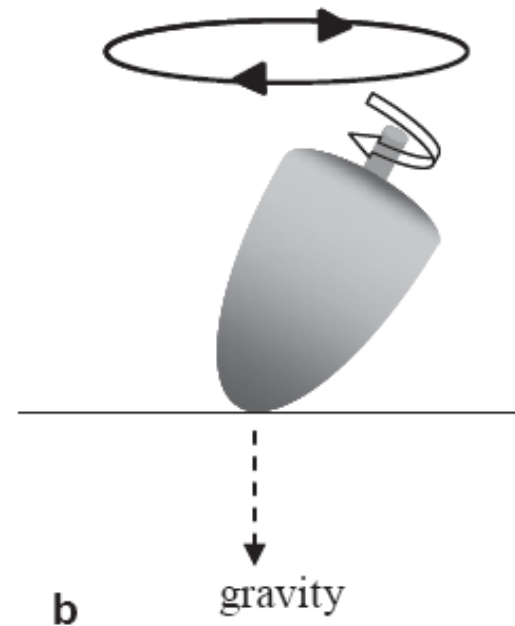
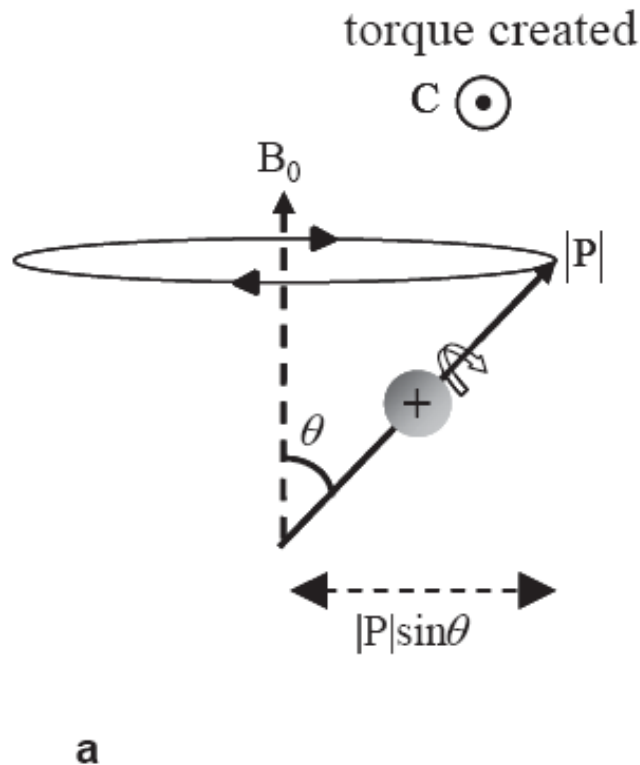
Π. Παπαγιάννης & Ε. Στυλιάρης
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΝ ΑΘΗΝΩΝ
2019 - 2020

Magnetic Resonance Imaging (MRI)

- Απεικόνιση Μαγνητικού Συντονισμού
- Μετάπτωση Larmor
- Χαρακτηριστικοί Χρόνοι T_1 και T_2
- Μαγνητική Απεικόνιση

ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ

$$\text{Συχνότητα Larmor: } \omega = \gamma B_0$$

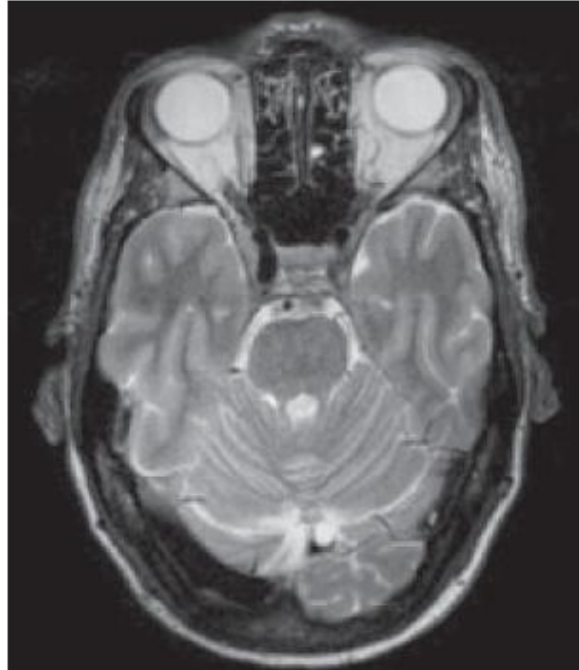


A proton in a magnetic field. (a) Using classical mechanics, the torque C acting on the magnetic moment, spinning about an internal axis, causes it to precess about the vertical axis, B_0 . (b) A familiar analogy is that of a spinning top: in this case the vertical force is gravity.

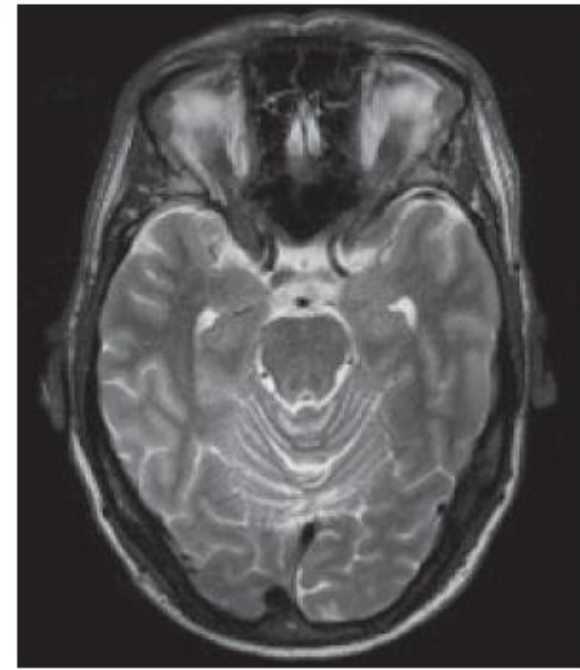
ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ



slice 1



slice 2



slice 3

Ακτινοπροστασία:

- Βιολογικές επιδράσεις ιοντιζουσών ακτινοβολιών
- Διεθνές σύστημα ακτινοπροστασίας

Δοσιμετρία:

- Εξωτερική (υπολογιστική, πειραματική)
- Εσωτερική

Π. Ι. Παπαγιάννης
Αν. Καθ.

Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής
Ιατρική Σχολή Αθηνών



210 7462442



ppapagi@med.uoa.gr

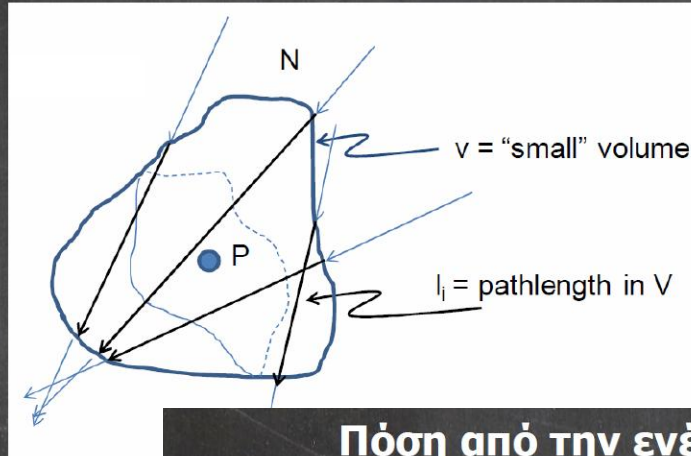


<http://mpl.med.uoa.gr/>
<http://www.rdl.gr/>

Περιγραφή πεδίου ακτινοβολίας

- η ροή μπορεί επίσης να οριστεί γενικότερα για οποιοδήποτε στοιχειώδη όγκο μέσω του «μήκους τροχιάς» των σωματιδίων

$$\Phi = \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ V \rightarrow 0}} \left\{ \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N l_i \right\}$$



Πόση από την ενέργεια που αφαιρείται απορροφάται;

- Η ενέργεια που αφαιρείται από τη δέσμη μοιράζεται σε διαφορετικά σωματίδια και με διαφορετικό τρόπο σε κάθε είδος αλληλεπίδρασης φωτονίων – ύλης τα οποία συμβαίνουν με διαφορετική σχετική πιθανότητα συναρτήσει του υλικού και της ενέργειας φωτονίων

$$\mu = \mu_{\text{coh}} + \mu_{\text{ph}} + \mu_{\text{incoh}} + \mu_{\text{pp}}$$

$$\mu/\rho = \mu_{\text{coh}}/\rho + \mu_{\text{ph}}/\rho + \mu_{\text{incoh}}/\rho + \mu_{\text{pp}}/\rho$$

- Ενδιαφέρει η ενέργεια που μεταφέρεται σε φορτισμένα σωματίδια μιας και λόγω της μικρής τους εμβέλειας σημαντικό μέρος της θα απορροφηθεί τοπικά

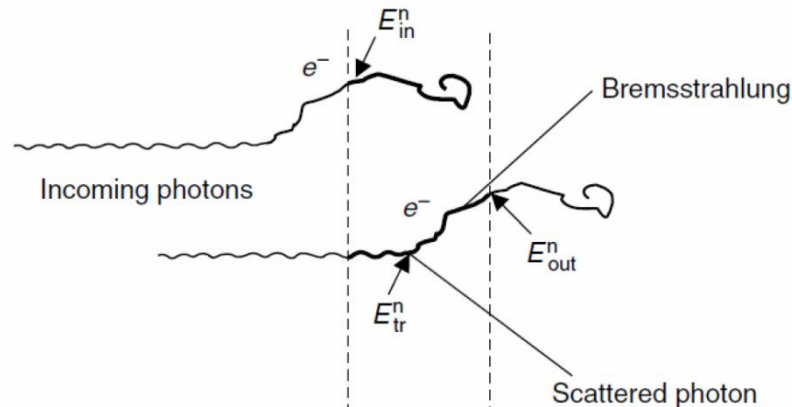
Συνθήκες ηλεκτρονιακής ισορροπίας (CPE)

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

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

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

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



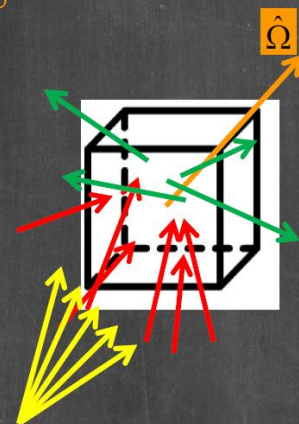
Υπάρχει εξίσωση που να περιλαμβάνει και τη σκεδαζόμενη;

Η βαθμίδα σε ένα στοιχείο του φασικού χώρου θα ισούνται:

φ. που σκεδάζονται σε αυτό από τα υπόλοιπα

+ φ. που εκπέμπονται από πηγή σε αυτό

- φ. που απορροφούνται ή σκεδάζονται



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

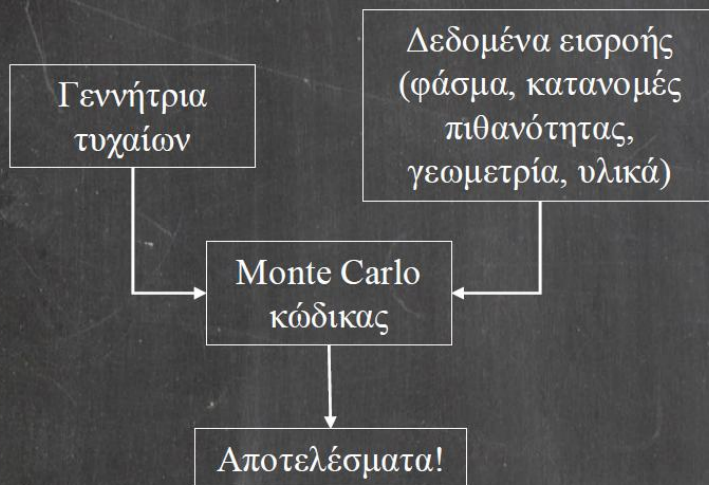
$$Q_{sc}(\mathbf{r}, E, \hat{\Omega})$$

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

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

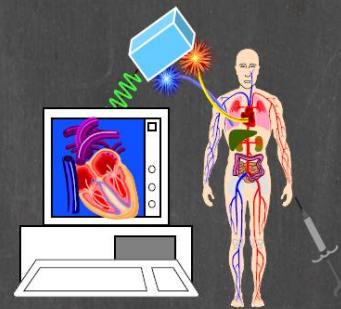
L.B.T.E.

Η αρχή της δοσιμετρίας με προσομοίωση Monte Carlo



Εσωτερική δοσιμετρία

- Με τον όρο «εσωτερική δοσιμετρία» αναφερόμαστε στον υπολογισμό της δόσης οργάνων από ραδιενεργά ισότοπα τα οποία προσλαμβάνονται από το ανθρώπινο σώμα και το ακτινοβολούν εκ των έσω.



Ακτινοπροστασία:

- Βιολογικές επιδράσεις ιοντιζουσών ακτινοβολιών
- Διεθνές σύστημα ακτινοπροστασίας

Δοσιμετρία:

- Εξωτερική (υπολογιστική, πειραματική)
- Εσωτερική

Π. Ι. Παπαγιάννης
Αν. Καθ.

Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής
Ιατρική Σχολή Αθηνών



210 7462442
ppapagi@med.uoa.gr



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

Βιολογικές επιδράσεις ιοντιζουσών ακτινοβολιών

Δομή της παρουσίασης:

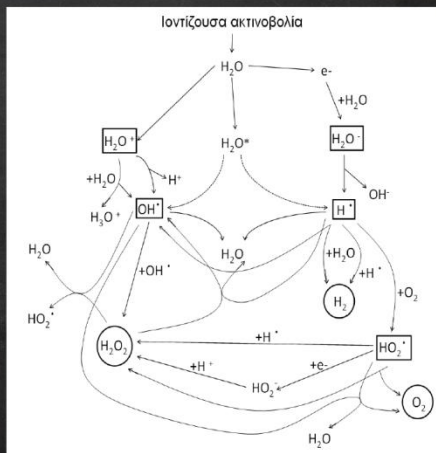
- Βιολογικά αποτελέσματα σε μοριακό επίπεδο
- Βιολογικά αποτελέσματα σε κυτταρικό επίπεδο
- Τροποποιητικοί παράγοντες της δράσης ιοντίζουσας ακτινοβολίας
- Βιολογικά αποτελέσματα σε επίπεδο ιστών - οργάνων – οργανισμού
- Κατηγοριοποίηση των βιολογικών αποτελεσμάτων:
 - Καθορισμένα αποτελέσματα (αντιδράσεις των ιστών)
 - Στοχαστικά αποτελέσματα

Η σημασία της βλάβης του DNA

Η θραύση χημικών δεσμών λόγω άμεσης ή έμμεσης δράσης ιοντίζουσας ακτινοβολίας προκαλεί διάφορα είδη βλάβης με σημαντικότερα:

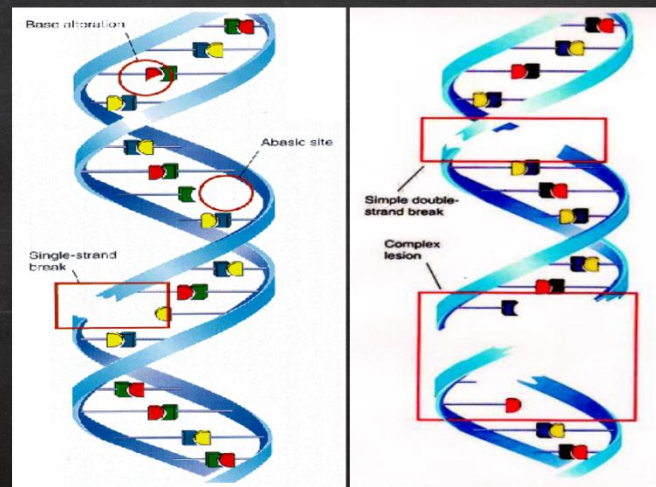
Ραδιόλυση του νερού

- Τα αρχικά προϊόντα της ραδιόλυσης συμμετέχουν ακολουθώντας σε δεκάδες αντιδράσεις μεταξύ τους ή με άλλα μόρια του συστήματος.
- Συνολικά επικρατεί ο **οξειδωτικός χαρακτήρας** λόγω της παραγωγής ελευθέρων ριζών υδροξυλίου ($\text{OH}^\cdot$) και υπεροξυλίου ($\text{HO}_2^\cdot$), και υπεροξειδίου του υδρογόνου (H_2O_2).



□ βλάβη ή απώλεια βάσεων

□ θραύση του ενός κλώνου (Single Strand Break-SSB)

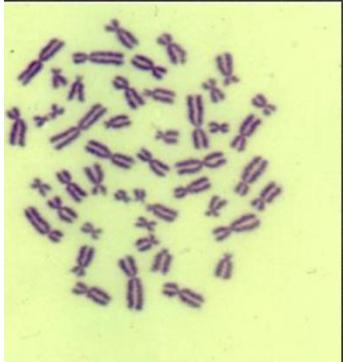


□ θραύση και των δύο κλώνων (Double Strand Break-DSB)

□ σύνθετη συστοιχία βλαβών

Χρωμοσωματικές ανωμαλίες

0 Gy



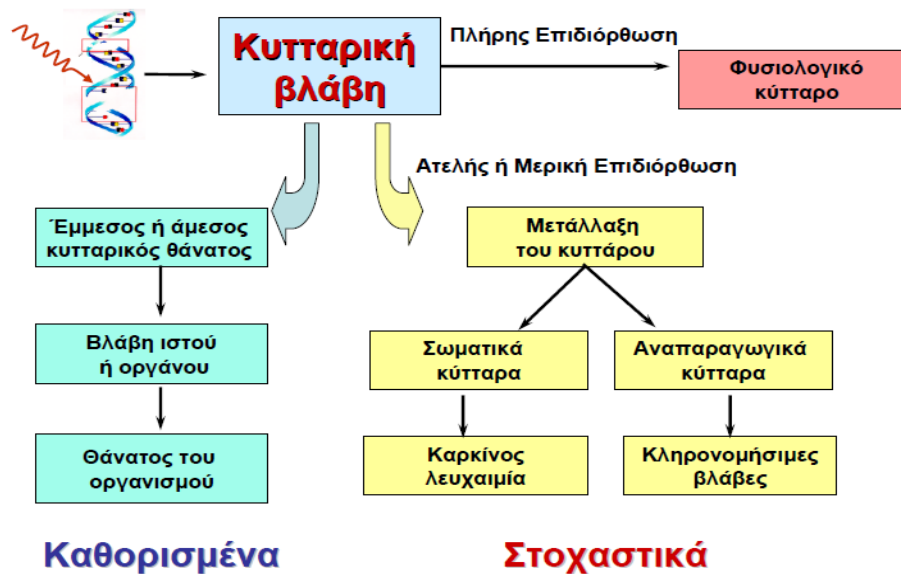
6 Gy στη G1



6 Gy στη G2

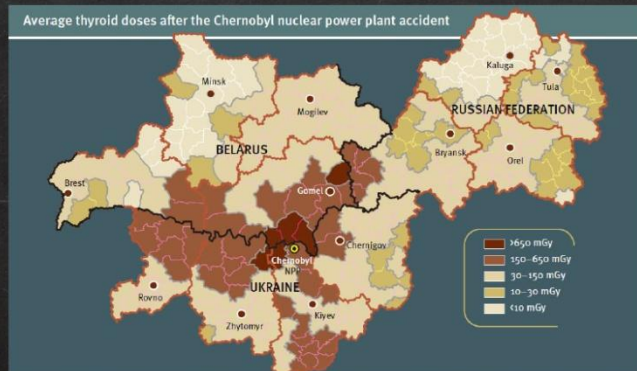


Βιολογικά αποτελέσματα των ακτινοβολών



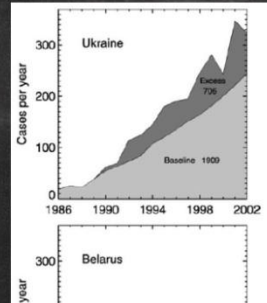
Στοχαστικά αποτελέσματα: πιθανότητα εμφάνισης ...;

- Τα αποτελέσματα από μελέτες ακτινοβολήσης κυττάρων και κυτταρικών καλλιιεργειών δεν μπορούν να προεκβληθούν σε επίπεδο οργανισμού.
- Είναι συνεπώς αναγκαία η καταφυγή σε στατιστικά δεδομένα (επιδημιολογικές μελέτες σύγκρισης εκτεθειμένων ομάδων με το μη εκτεθειμένο πληθυσμό ώστε να παρατηρηθεί στατιστικά πιθανώς αυξημένη συχνότητα εμφάνισης επιβλαβών συνεπειών).



UNEP Rad. Effects and Sources 2016

Jacob



Στοχαστικά αποτελέσματα: εκτίμηση κινδύνου καρκίνου

Βιολογικά αποτελέσματα ακτινοβολήσης κατά την κύηση

- Ο κίνδυνος καρκινογένεσης κατόπιν έκθεσης κατά τη διάρκεια της κύησης κρίνεται ότι δεν είναι μεγαλύτερος από αυτό που επάγει η έκθεση κατά την παιδική ηλικία.
- Όσον αφορά τις αντιδράσεις των ιστών (καθορισμένα αποτελέσματα) λόγω έκθεσης κατά την κύηση:
 - Για την εμφάνιση δυσπλασίας και νευρολογικών αποτελεσμάτων θεωρείται ότι απαιτείται υπέρβαση κατωφλίου δόσης 100 mGy.
 - Παρότι παραμένει αβέβαια η σχέση της δόσης με την μείωση του IQ, ο κίνδυνος κρίνεται άνευ πρακτικής σημασίας σε χαμηλές δόσεις.

Πίνακας 3. Εκτίμηση του δια βίου κινδύνου (Lifetime Attributable Risk-LAR) εμφάνισης συμπαγούς καρκινικού όγκου και θνησιμότητας λόγω αυτού* κατόπιν ακτινοβολήσης μελών του πληθυσμού των Η.Π.Α. (διάστημα εμπιστοσύνης 95%**). Τα αποτελέσματα αυτά αντιστοιχούν σε αριθμό περιστατικών ή θανάτων ανά 100.000 εκτεθειμένα άτομα. (BEIR VII, 2006)

Σενάριο έκθεσης	Εμφάνιση		Θνησιμότητα	
	Ανδρες	Γυναίκες	Ανδρες	Γυναίκες
Gy στο γενικό πληθυσμό	800 (400, 1590)	1310 (690, 2490)	410 (200, 830)	610 (300, 1230)
1Gy σε ηλικία 10 ετών	1330 (660, 2660)	2530 (1290, 4930)	640 (300, 1390)	1050 (470, 2330)
1Gy σε ηλικία 30 ετών	600 (290, 1260)	1000 (500, 2020)	320 (150, 650)	490 (250, 950)
1Gy σε ηλικία 50 ετών	510 (240, 1100)	680 (350, 1320)	290 (140, 600)	420 (210, 810)
mGy ανά έτος ισοβίως	550 (280, 1100)	970 (510, 1840)	290 (140, 580)	460 (230, 920)
Gy ανά έτος από 18-65 έτη	2600 (1250, 5410)	4030 (2070, 7840)	1410 (700, 2860)	2170 (1130, 4200)

* αποτέλεσμα άθροισης των επιμέρους LAR με χρήση DDREF=1.5

** περιλαμβάνεται η αβεβαιότητα της δειγματοληψίας, της μεταφοράς στον εν λόγω πληθυσμό, και του DDREF