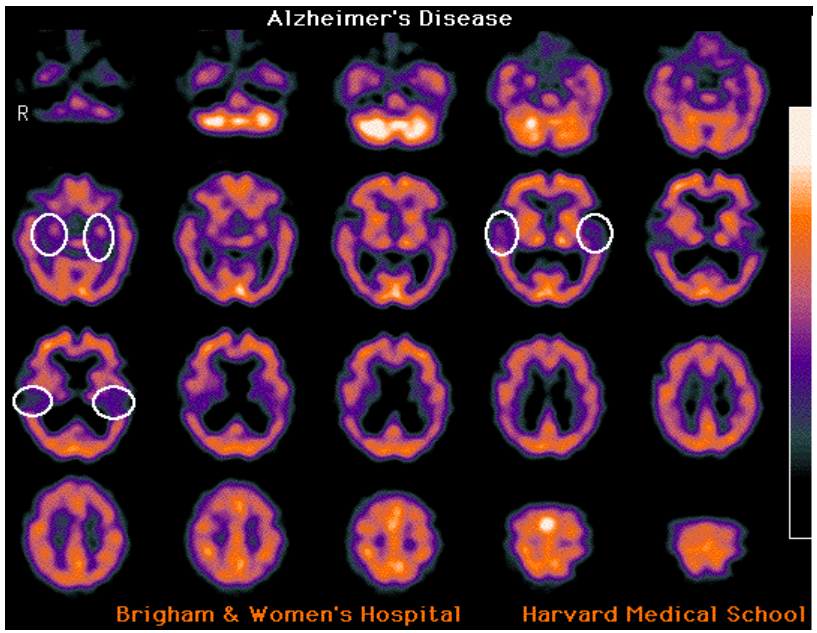
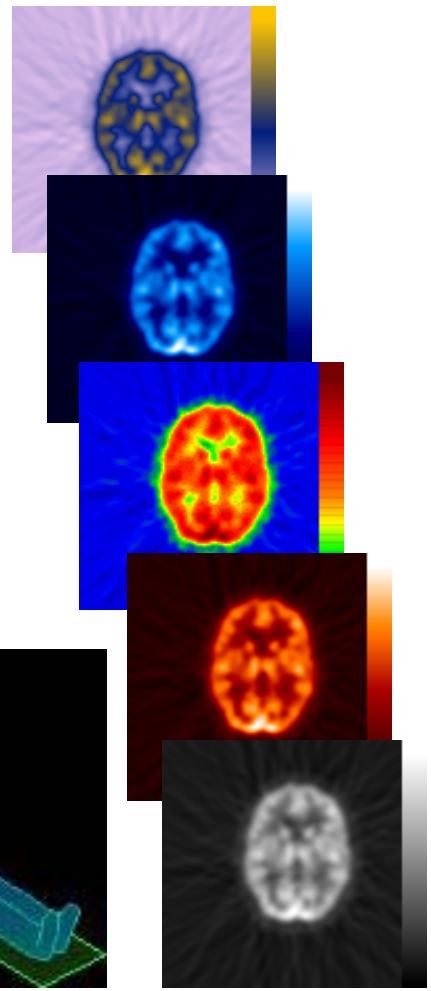
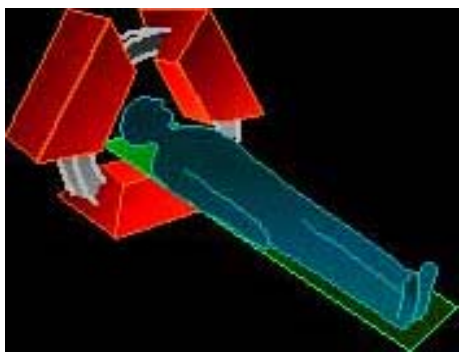
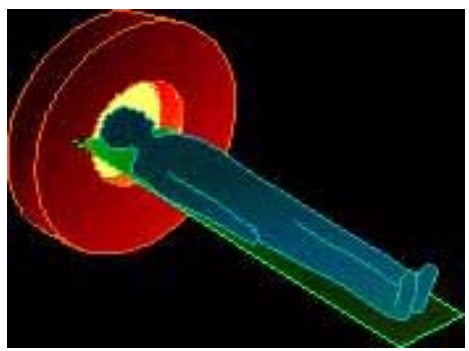
1. ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕ ΙΣΟΤΟΠΑ

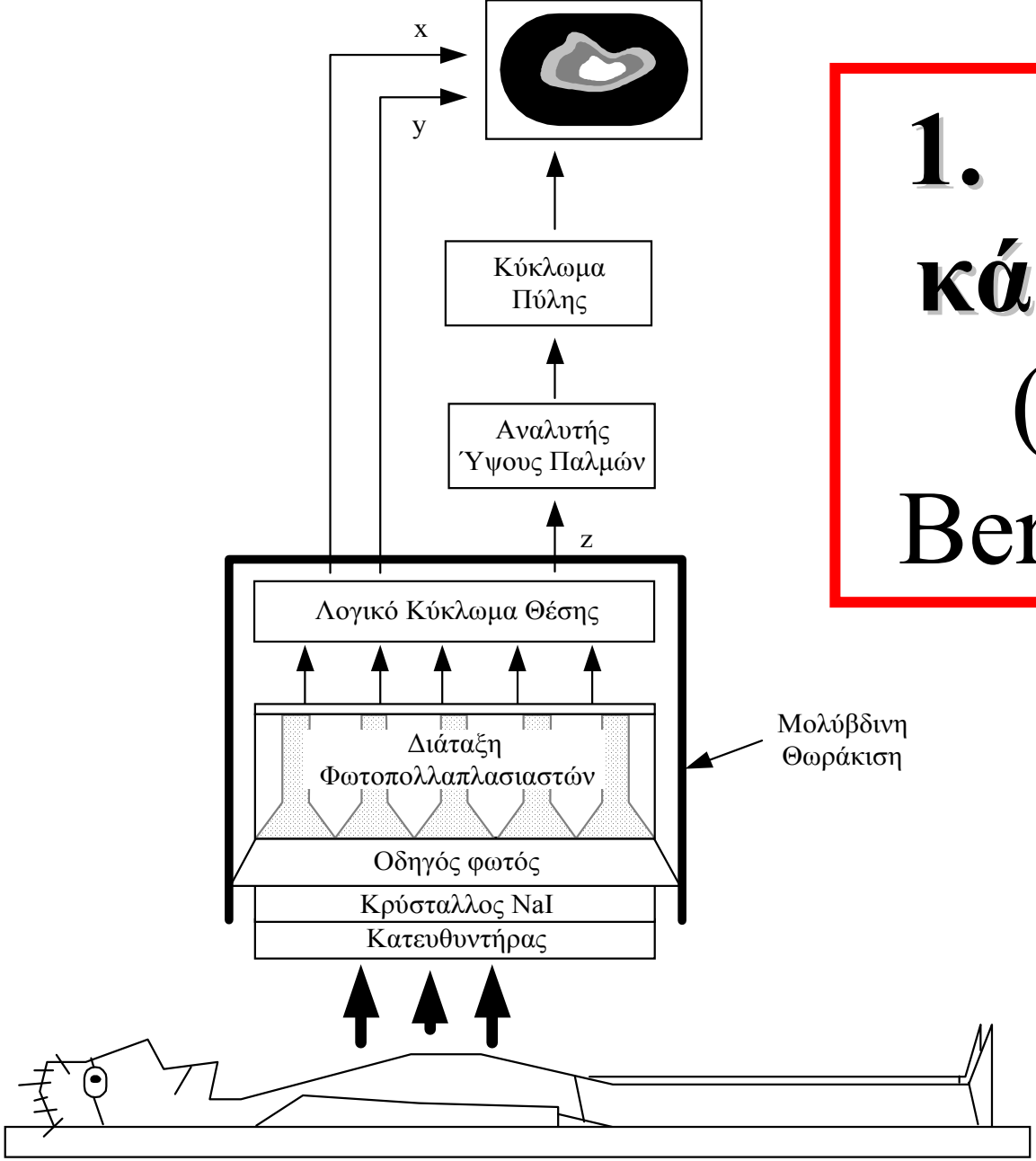








1. γ-κάμερα ή κάμερα Anger (H. Anger, Berkeley, 1958)



ΣΤΟΙΧΕΙΑ της Γ-ΚΑΜΕΡΑ:

- **κατευθυντήρας** (collimator),
- **σπινθηριστής** NaI (scintillator),
- συστοιχία **φωτοπολλαπλασιαστών** (photomultipliers)
- τα απαραίτητα **ηλεκτρονικά** συστήματα (καταγραφή της θέσης των σπινθηρισμών και ανάλυση του εύρους των παλμών)
- **μολύβδινη θωράκιση** αρκετού πάχους (για να αποκλειστεί η επίδραση από ακτινοβολία εκτός της υπό εξέταση περιοχής)

Σύστημα πυρηνικής ιατρικής με δύο κεφαλές σε γωνία 90°

Σύστημα πυρηνικής ιατρικής με μια κεφαλή

Λειτουργία γ-κάμερα

- Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία μέσω κατευθυντήρα συναντά τον **κρύσταλλο του σπινθηριστή**, όπου απορροφώνται τα φωτόνια και παράγονται **σπινθηρισμοί** (ορατών φωτονίων) στο σημείο απορρόφησης.

- Η **ένταση** των σπινθηρισμών είναι ανάλογη του αριθμού των φωτονίων που προσπίπτουν στον κρύσταλλο.

- Η φωτοκάθοδος των **φωτοπολλαπλασιαστών**, βρίσκεται σε **οπτική επαφή** με τον κρύσταλλο με τη βοήθεια του **κυματοδηγού (light guide)**, μαζί με το **λογικό κύκλωμα θέσης**, δίνουν τις συντεταγμένες (x,y) της θέσης του κάθε σπινθηρισμού που παράγεται στον κρύσταλλο.

- Δημιουργείται έτσι ένα **αποτύπωμα** των σπινθηρισμών, το οποίο περιγράφει την κατανομή της ιοντίζουσας ακτινοβολίας του υπό μελέτη δείγματος.

Λειτουργία γ-κάμερα ΙΙ

- Ο κάθε φωτοπολλαπλασιαστής παράγει **ηλεκτρικό παλμό** ανάλογο της έντασης του φωτός που διεγείρει την φωτοκάθοδο.

- Ο **αναλυτής ύψους παλμών** επιλέγει τα γεγονότα που θα καταγραφούν με βάση ένα καθορισμένο «**ενεργειακό παράθυρο**».

- Ο καθορισμός του **ενεργειακού παραθύρου** γίνεται με κριτήριο το φάσμα της ραδιενεργού πηγής.

- Αν χορηγηθεί σε ασθενή **^{99m}Tc**, το οποίο εμφανίζει μέγιστο στα **140 keV**, ο αναλυτής ύψους παλμών καταγράφει γεγονότα σε ένα «ενεργειακό» παράθυρο 10%, δηλαδή από 130 keV έως 150 keV.

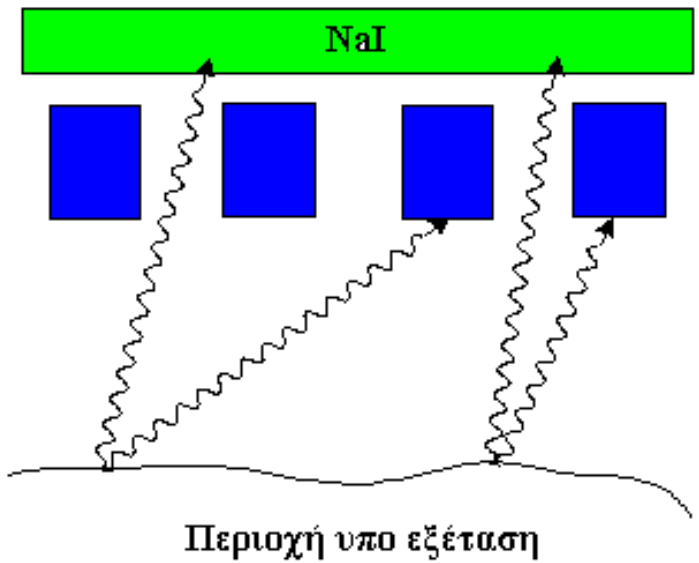
- Τελικά, τα καταγραφόμενα γεγονότα μεταφέρονται σε **ψηφιακή μήτρα κωδικοποίησης**.

Κατευθυντήρες

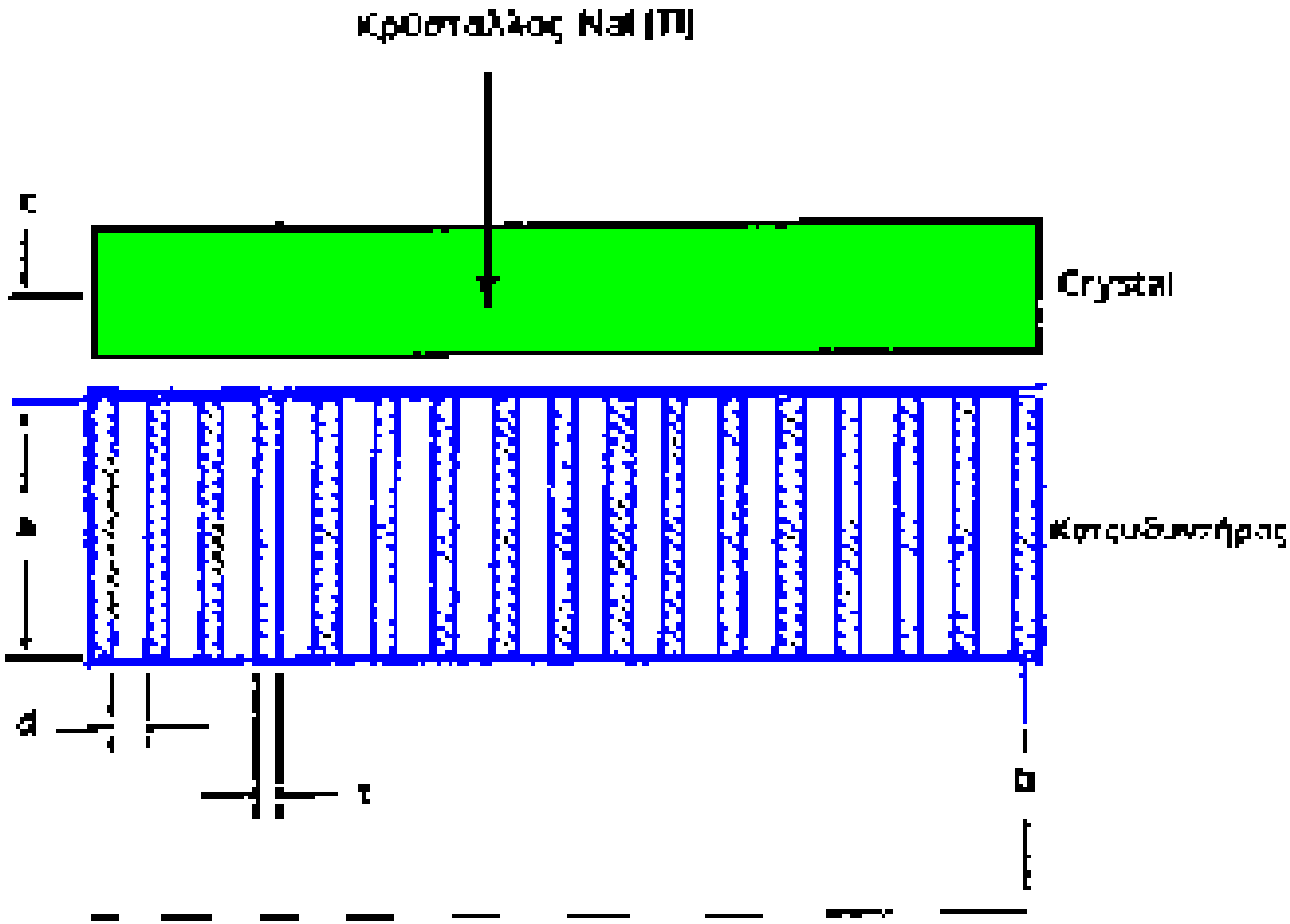
- Ο κατευθυντήρας αποτελεί τον **γεωμετρικό επιλογέα** φωτονίων και παρεμβάλλεται μεταξύ του σπινθηριστή και της υπό εξέταση περιοχής.

- Ο ρόλος του κατευθυντήρα είναι αντίστοιχος με αυτόν του φακού μιας φωτογραφικής μηχανής και καθορίζει τη **διεύθυνση** και την **περιοχή προέλευσης** των φωτονίων που καταμετρούνται.

- Η περιοχή την οποία βλέπει ο κατευθυντήρας ονομάζεται ορατό πεδίο (**Field Of View - FOV**).



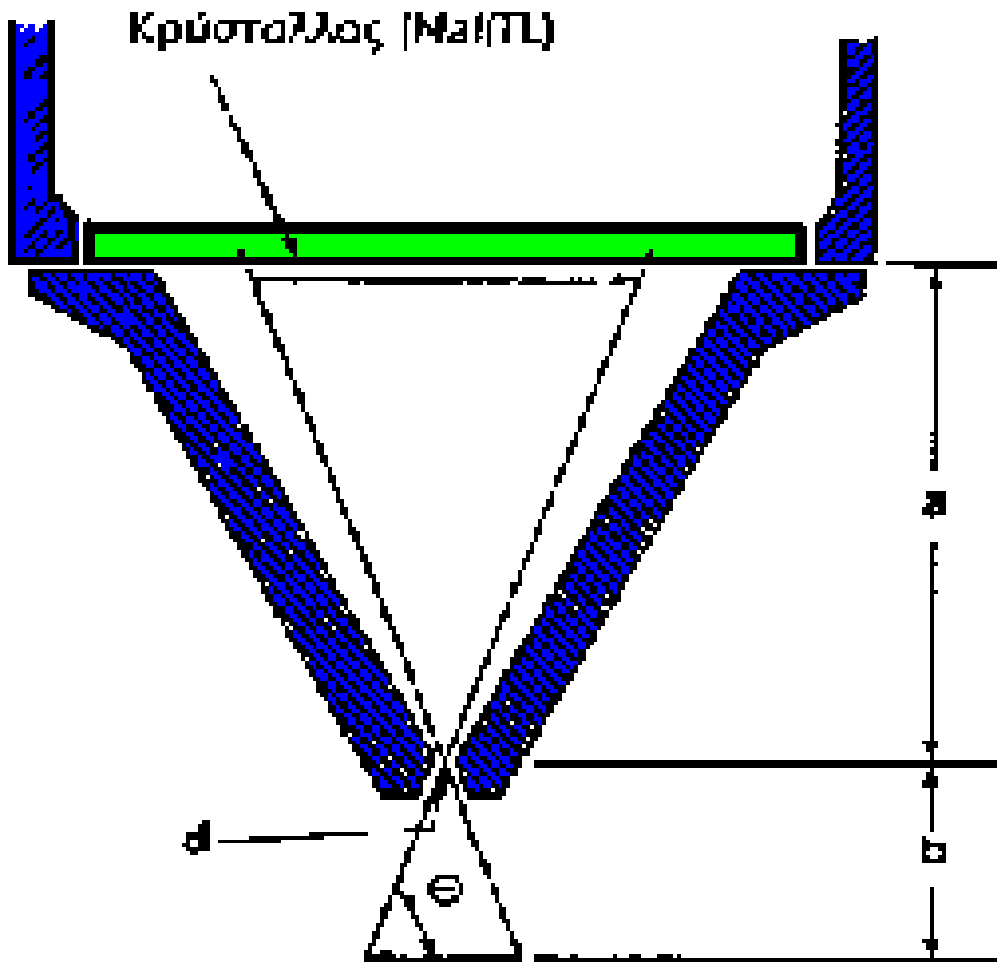
Κατευθυντήρες παραλλήλων οπών (*parallel-hole collimator*)



Κατευθυντήρες τύπου καρφίδος (*pinhole collimator*)

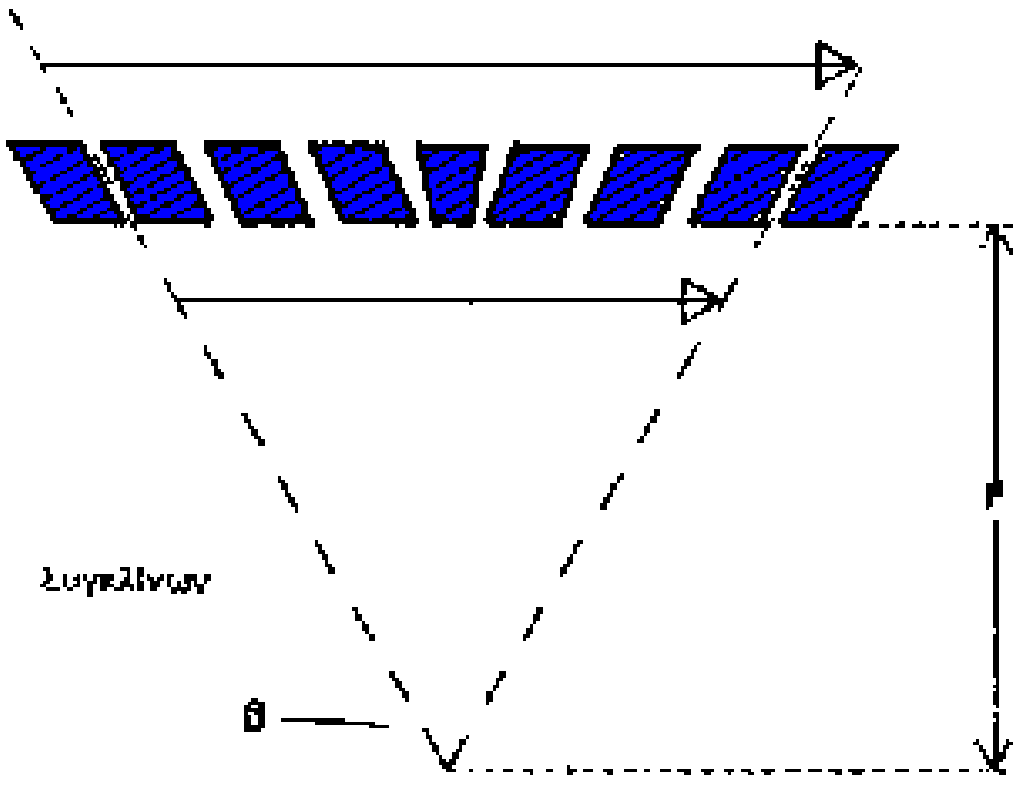
- Η οπή του κατευθυντήρα είναι της τάξης των 3-5 mm.
- Η εικόνα μεγεθύνεται όταν η απόσταση b, από την πηγή μέχρι την καρφίδα είναι μικρότερη από το μήκος a του κώνου του κατευθυν-τήρα, διαφορετικά σμικρύνεται.
- Σε όλες τις περιπτώσεις η εικόνα είναι ανεστραμμένη και το μέγεθός της με αυτό του αρχικού αντικειμένου συνδέονται με τη σχέση:

I / O = α / b



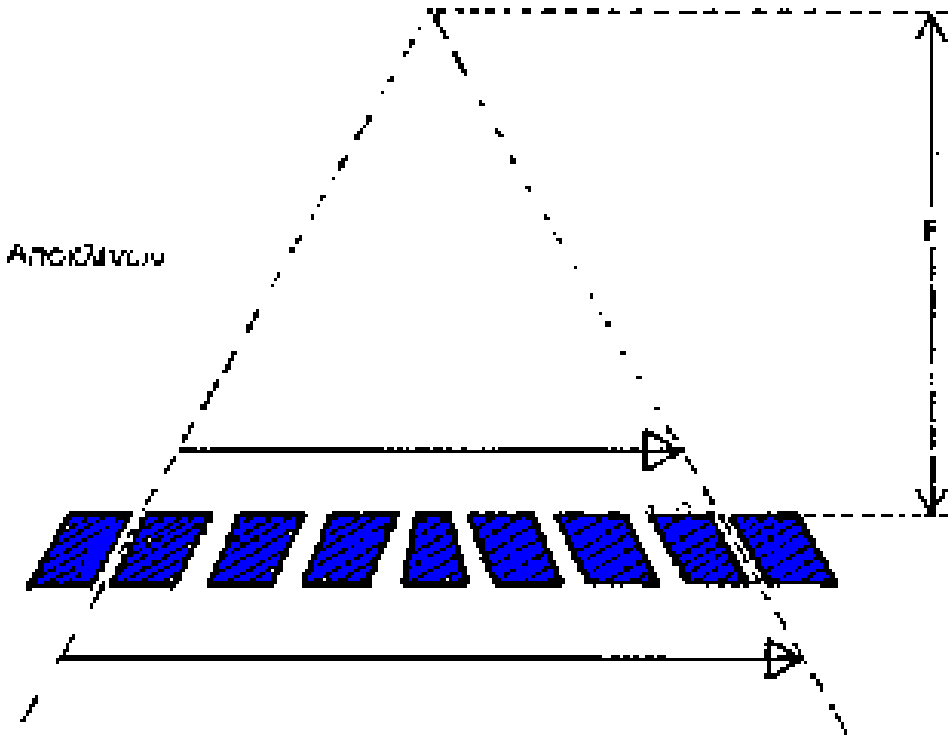
Κατευθυντήρες με αποκλίνουσες οπές (*diverging multihole collimator)*

- Ο κατευθυντήρας έχει οπές που αποκλίνουν από τον ανιχνευτή σε απόσταση 40-50 cm πίσω από τον κατευθυντήρα.
- Αποτέλεσμοα είναι: είδωλο σε σμίκρυνση και ο βαθμός της σμίκρυνσης εξαρτάται από την απόσταση ***f***, την απόσταση ***b*** και το πάχος ***t*** του κατευθυντήρα
- **I / O = (f - t) / (f + b)**



Κατευθυντήρας με συγκλίνουσες οπές (converging multihole collimator)

- Οι οπές συγκλίνουν σε σημείο 40-50 cm μπροστά από τον κατευθυντήρα.
- Για αντικείμενα μπροστά από τον κατευθυντήρα μέχρι το σημείο σύγκλισης, το είδωλο είναι ορθό και μεγενθυμένο.
- **I / O = (f + t) / (f + t - b)**

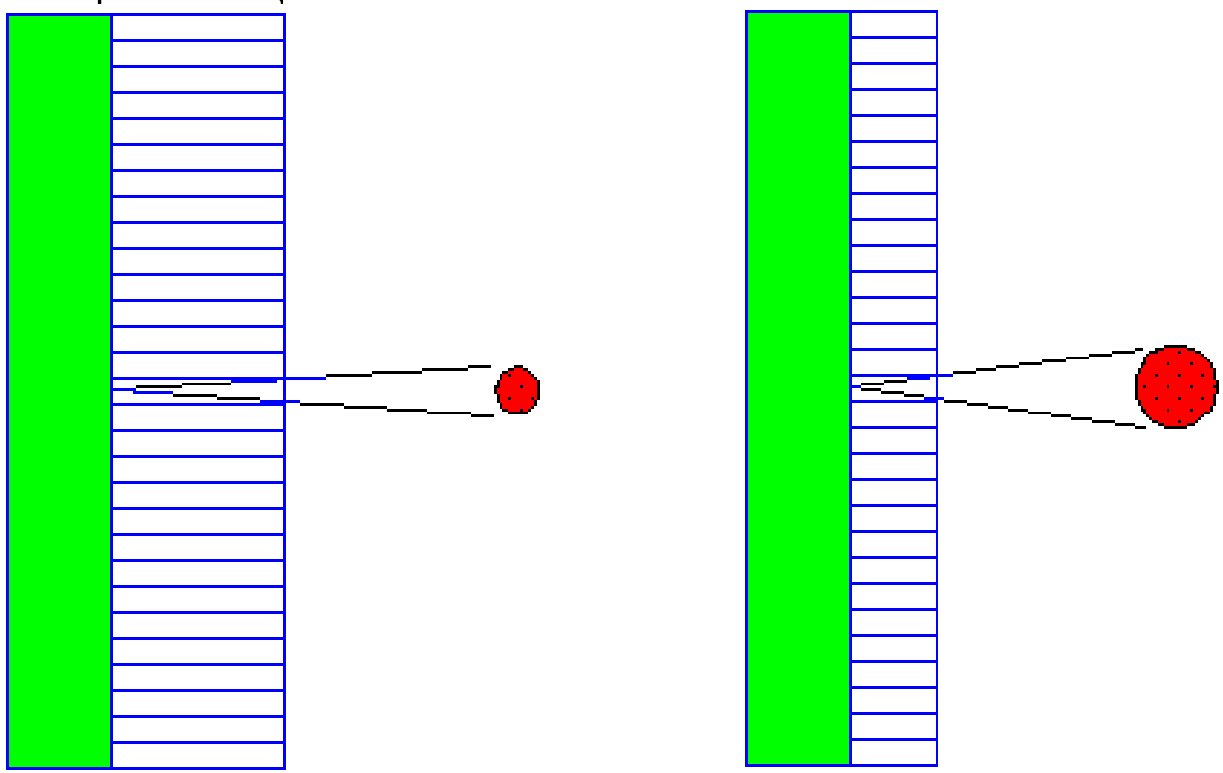


Η Διακριτική Ικανότητα των Κατευθυντήρων

Η διακριτική ικανότητα είναι:

- ανάλογη του μήκους των οπών
- ανάλογη του πλήθους των οπών ανά μονάδα επιφάνειας.

Παρατήρηση: τα τοιχώματα των οπών θα πρέπει να είναι **αρκετά** ώστε να απορροφούν τα φωτόνια που προσπίπτουν

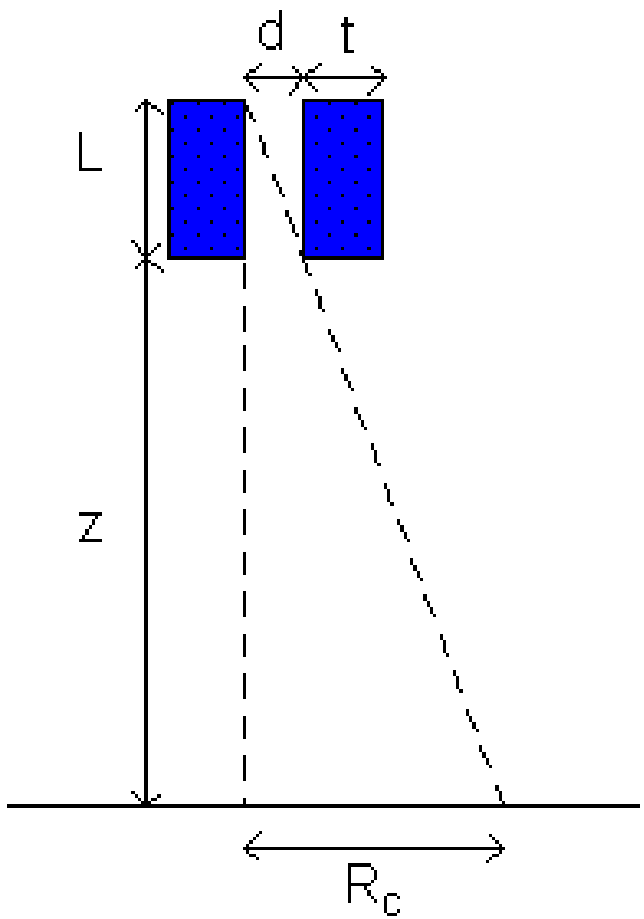


Η χωρική διακριτική των Κατευθυντήρων

Η χωρική διακριτική ικανότητα εκφράζεται στην **απεικόνιση λεπτομερειών** μικρών διαστάσεων.

Για κατευθυντήρα **παράλληλων οπών**, η διακριτική ικανότητα εκφράζεται ως **συνάρτηση των γεωμετρικών** του χαρακτηριστικών:

$$R_c \approx d(L + z) / L$$



Η ευαισθησία των Κατευθυντήρων

Η **ευαισθησία g** (που συνήθως χαρακτηρίζεται ως γεωμετρική) αναφέρεται στο ποσοστό των φωτονίων που εκπέμπονται από μια περιοχή και διέρχονται μέσω του κατευθυντήρα.

Για κατευθυντήρα **παράλληλων οπών** η ευαισθησία:

$\mathbf{g \approx [kd^2 / L(d + t)]^2}$ όπου k είναι μια σταθερά που εξαρτάται από το γεωμετρικό σχήμα των οπών.

Αν: $\mathbf{z >> L}$ και $\mathbf{d >> t}$ ισχύει κατά προσέγγιση η αναλογία: $\mathbf{g \propto R_c^2}$

Επομένως, η **διακριτική ικανότητα** του κατευθυντήρα **βελτιώνε-ται** εις βάρος της μειωμένης **ευαισθησίας** για δεδομένο πάχος των τοιχωμάτων των οπών.

Επιλογή Κατευθυντήρα

Η επιλογή κατάλληλου κατευθυντήρα βασίζεται στην **ενέργεια των φωτονίων** που εκπέμπει το ισότοπο και στην επιθυμητή **χωρική διακριτική ικανότητα** και **ευαισθησία**.

Στον πίνακα φαίνονται παραδείγματα κατευθυντήρων παράλληλων οπών με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους [15] για χρήση με **γ-κάμερα των 40 cm**:

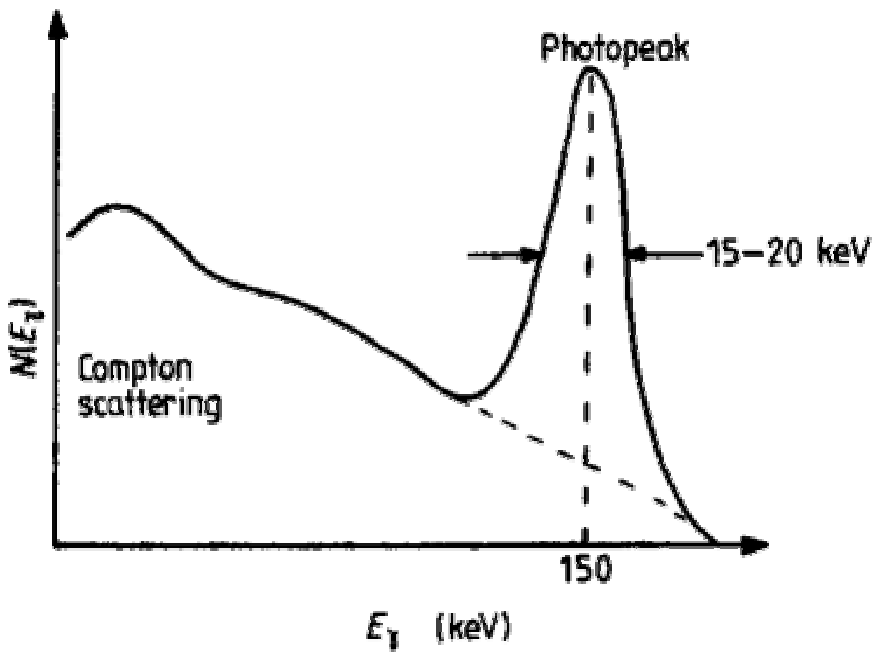
Περιγραφή	**Διάμετρος οπών (mm)**	**Πλήθος οπών**	**Πάχος τοιχωμάτων οπών (mm)**
Low Energy High Resolution (LEHR)	1.8	30000	0.3
Low Energy General Purpose (LEGP)	2.5	18000	0.3
Low Energy High Sensitivity (LEHS)	3.4	9000	0.3
Medium Energy High Sensitivity (MEHS)	3.4	6000	1.4

Ανιχνευτές σπινθηρισμών

- Οι ***σπινθηριστές (scintillators)*** είναι υλικά που εκπέμπουν σπινθηρισμούς (παλμούς φωτός) όταν τα μόριά τους διεγερθούν και χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ιοντιζουσών ακτινοβολιών.

- Στην πυρηνική ιατρική χρησιμοποιούνται κυρίως **κρύσταλλοι NaI** με προσμίξεις ***Tl***, οι οποίες ευνοούν την εκπομπή σπινθηρισμών.

- Τα υλικά αυτά εκπέμπουν σχεδόν **ορατό φως** όταν απορροφούν ενέργεια από ιοντίζουσες ακτινοβολίες και χρησιμοποιούνται τόσο στη μέτρηση όσο και στην απεικόνιση ραδιοϊσοτόπων.



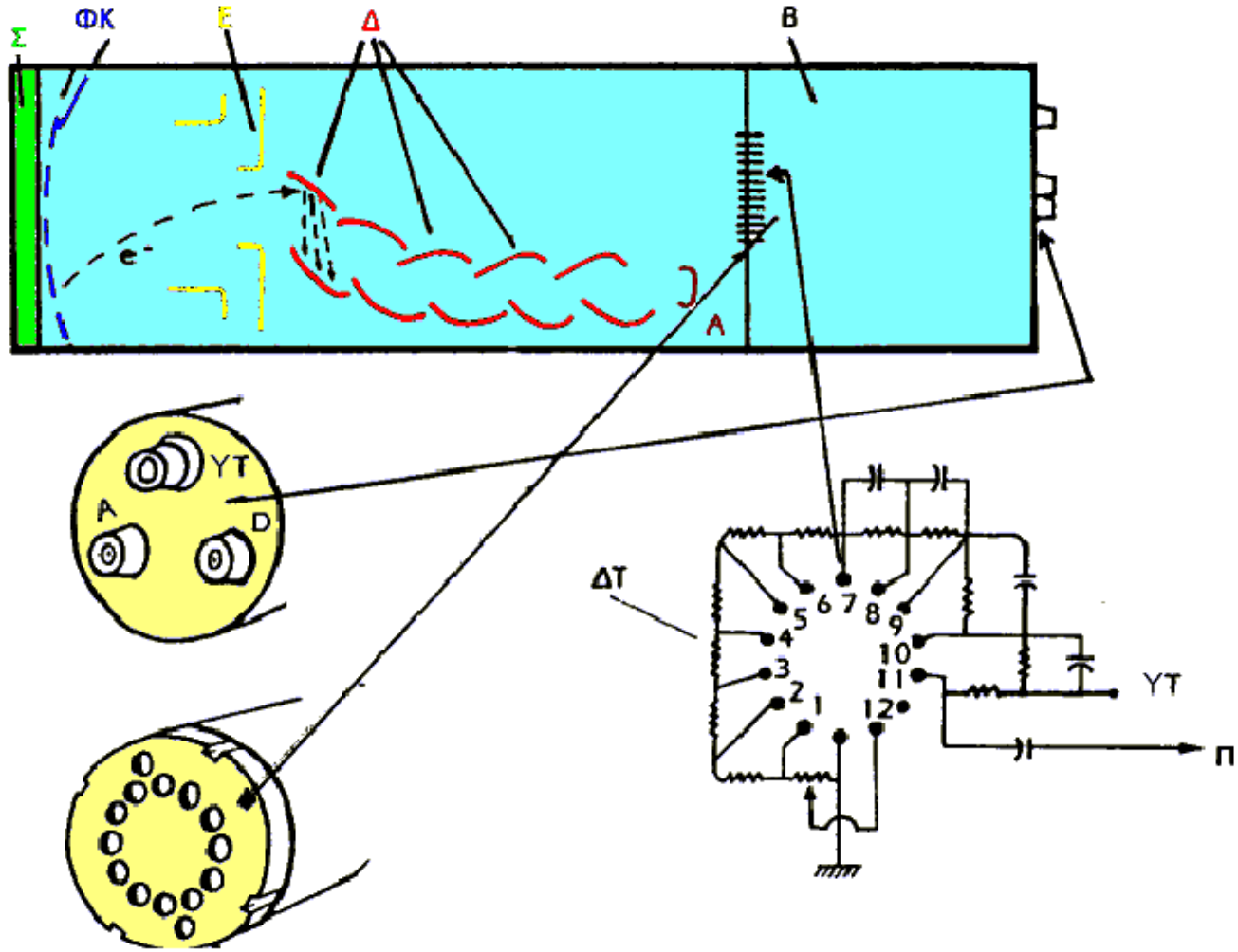
Η ενεργειακή διακριτική ικανότητα ενός λεπτού κρυστάλλου ***NaI(Tl)*** *στα* ***150 keV***

Φωτοπολλαπλασιαστές

Τα παραγόμενα φωτόνια οδηγούνται μέσω κυματοδηγών σε συστήματα τα οποία ονομάζονται ***φωτοπολλαπλασιαστές (photomultiplier tube - PM)***.

Οι φωτοπολλαπλασιαστές **μετατρέπουν** το εισερχόμενο φως σε ανιχνεύσιμο **ηλεκτρικό σήμα**.

Η εκπομπή φωτός είναι **ανάλογη** της **ενέργειας** που απορροφάται από τον σπινθηριστή και με αυτόν τον τρόπο όχι μόνο ανιχνεύονται τα παραγόμενα φωτόνια αλλά καθορίζεται και η **ενέργειά** τους.



Φωτοπολ/σιαστής (ΦΠ)

Σ: *σπινθηριστής,*
ΦΚ: *φωτοκάθοδος,*
Ε: *σύστημα εστίασης φωτοηλεκτρονίων,*
Δ: *δύνοδοι,*

Α: *άνοδος,*

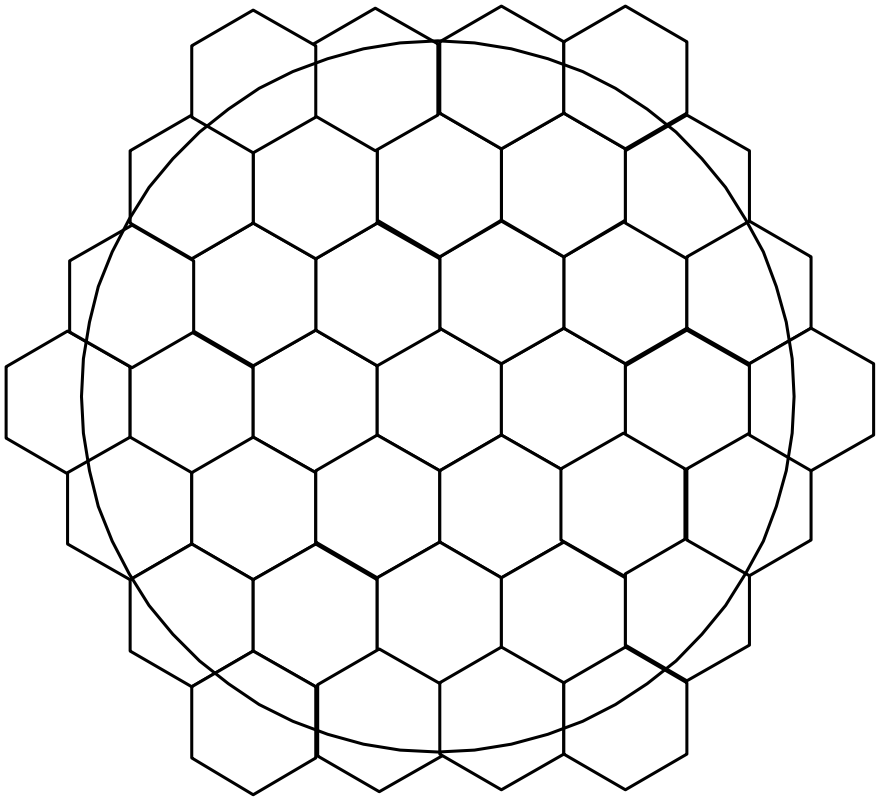
Β: *βάση ΦΠ,*

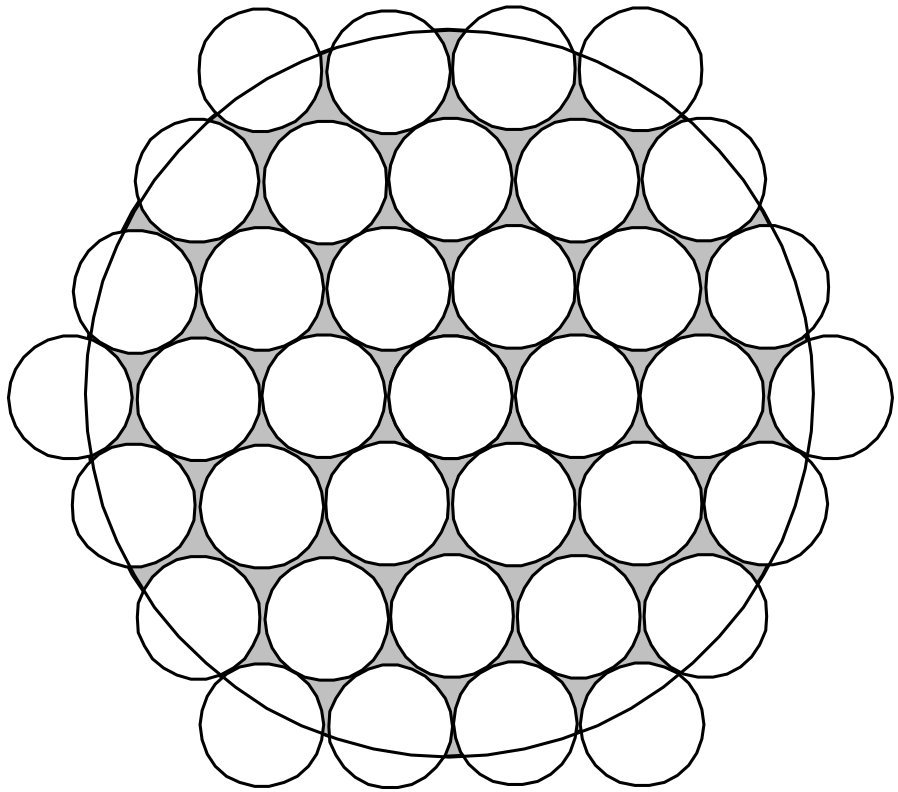
ΔΤ: *διαιρέτης τάσης (βρίσκεται μέσα στη βάση),*

e-: *φωτοηλεκτρόνιο,*
ΥΤ: *υψηλή τάση,*

Π: *έξοδος παλμού*

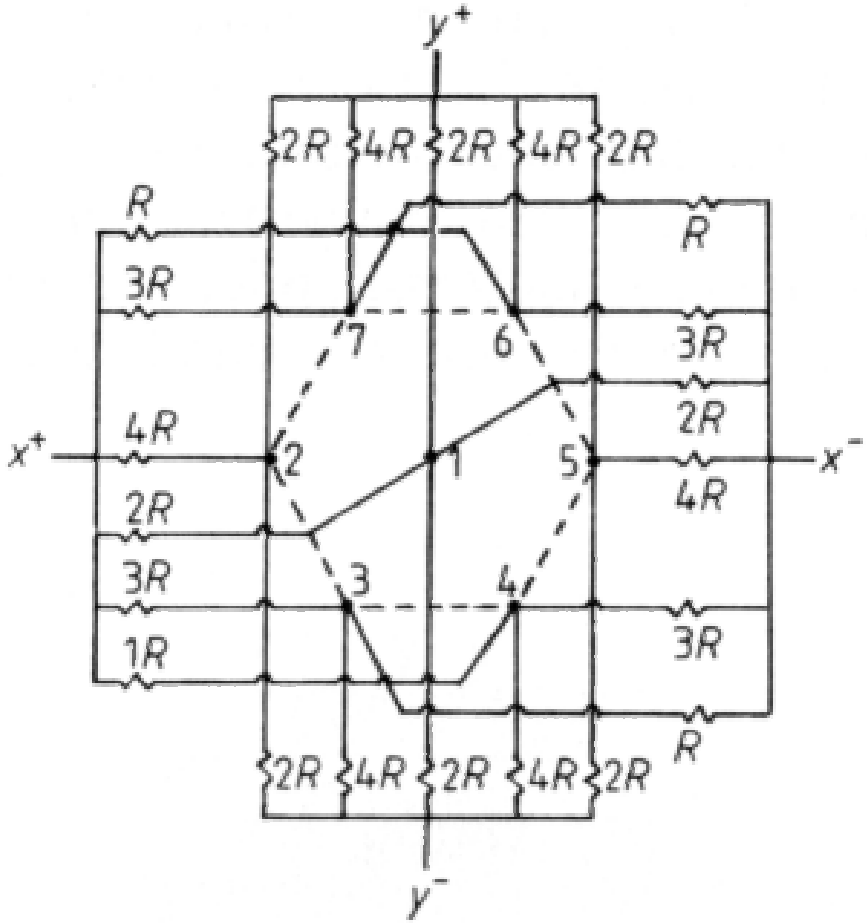
Κατανομή 37 εξαγωνικών και κυκλικών φωτοπολλαπλασιαστών πάνω στον κρύσταλλο μιας γ-κάμερα





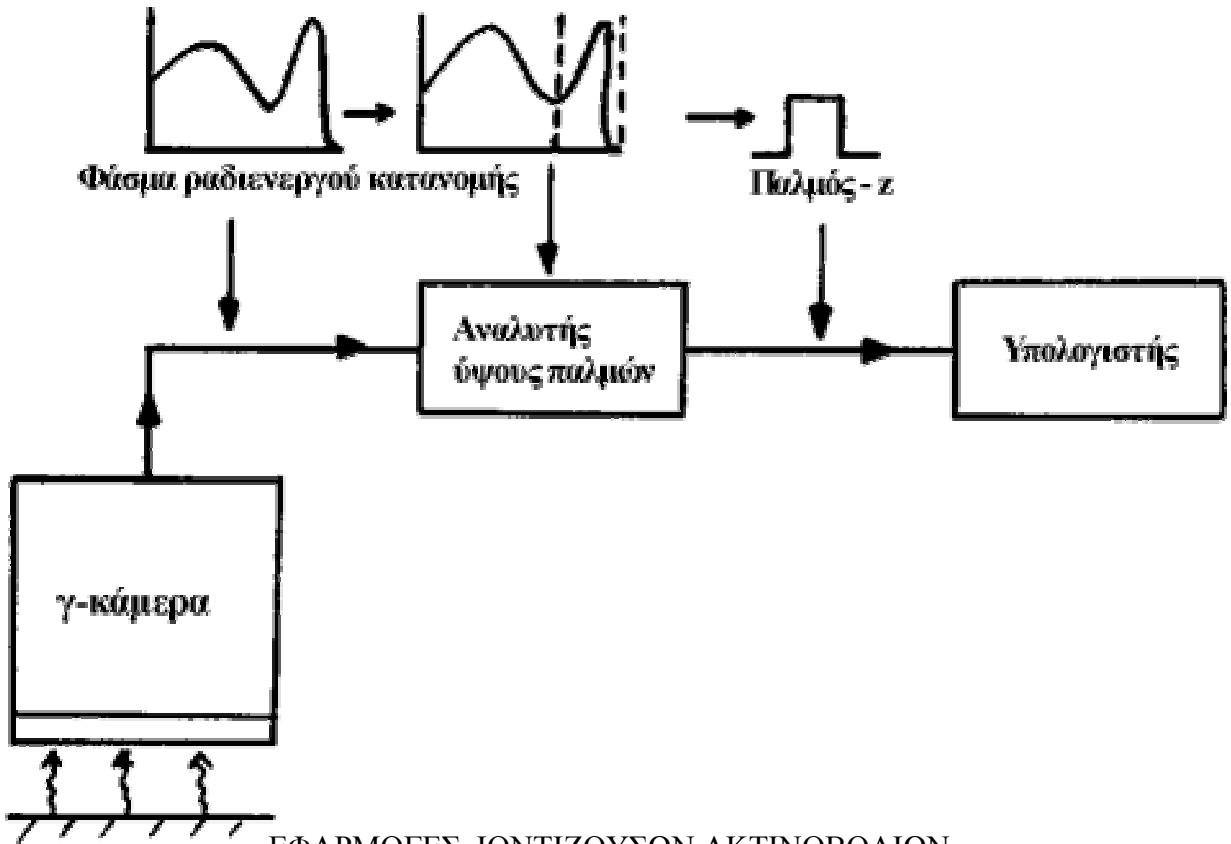
Το Ηλεκτρονικό σύστημα

- Η συνδεσμολογία των αντιστάσεων γίνεται έτσι ώστε **σε κάθε** φωτοπολλαπλασιαστή να αντιστοιχούν τέσσερις αντιστάσεις, $R_x^+, R_x^-, R_y^+, R_y^-$
- Κατά συνέπεια, από κάθε φωτοπολλαπλασιαστή θα πηγάζουν τέσσερα ρεύματα X^+, X^-, Y^+, Y^-, με εντάσεις που θα καθορίζονται από τις τιμές των αντιστάσεων.
- $Z = X^+ + X^- + Y^+ + Y^-$
- $x = k(X^+ + X^-)/Z$
- $y = k(Y^+ + Y^-)/Z$, k = σταθερά.

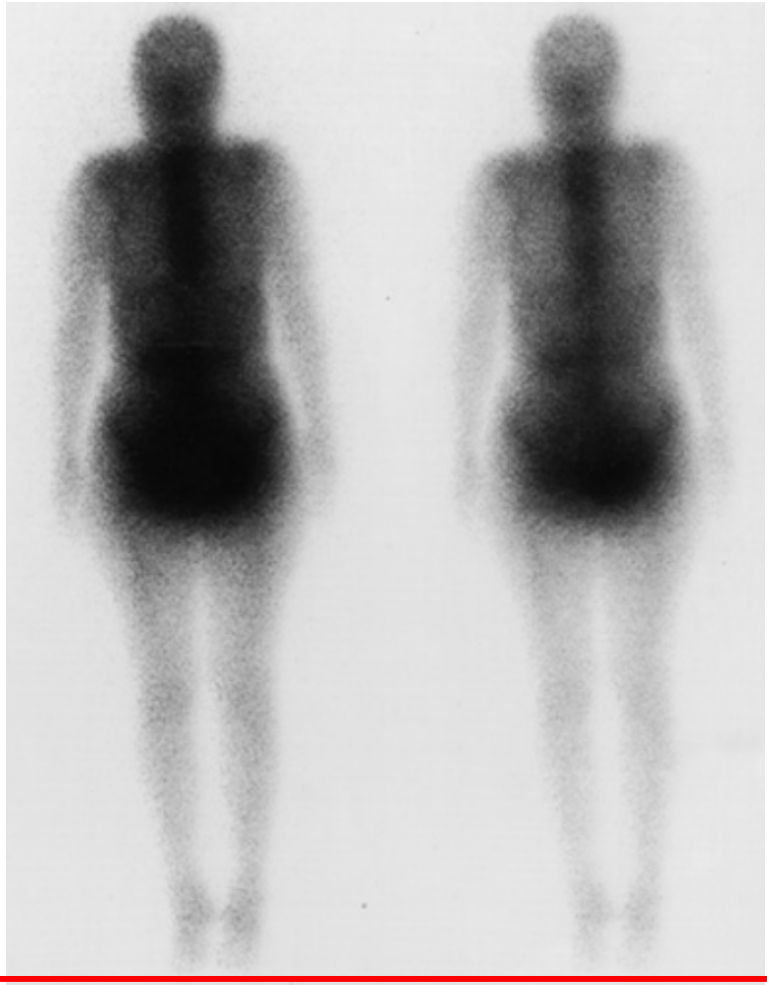


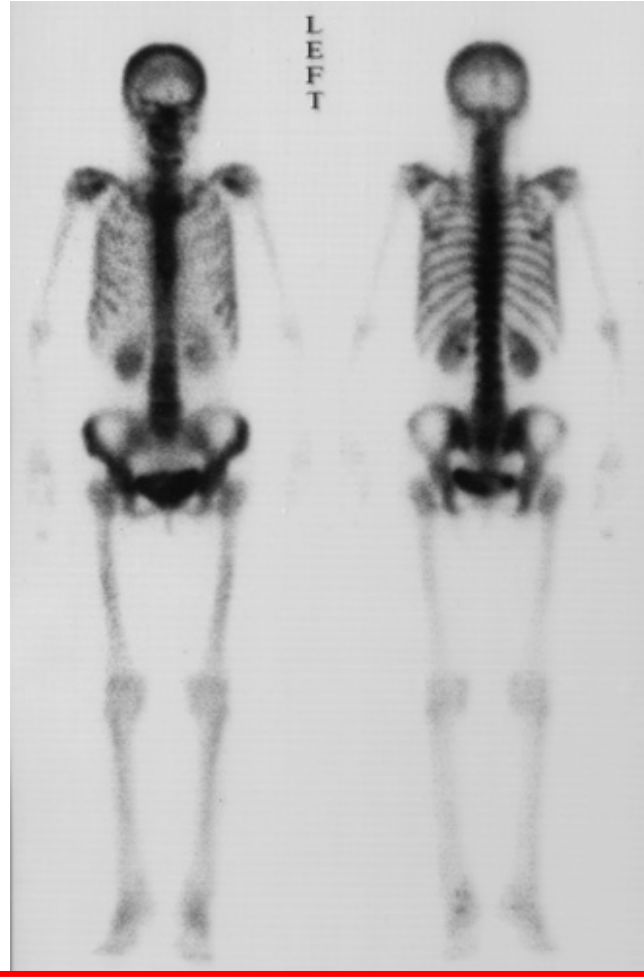
Ο **παλμός Z** οδηγείται σε έναν **αναλυτή ύψους παλμών (pulse height analyzer)** για να καθοριστεί αν το σήμα που ανιχνεύθηκε είναι το αναμενόμενο από μια κατανομή συγκεκριμένου ραδιοφαρμάκου.

Ο αναλυτής ύψους παλμών καθορίζει το **ενεργειακό παράθυρο** και εξασφαλίζει την απόρριψη γεγονότων χαμηλότερης ενέργειας (σκεδαζόμενα φωτόνια) τα οποία θα μείωναν δραματικά την ποιότητα της εικόνας.



Ρύθμιση του Ενεργειακού Παραθύρου





*Σπινθηρογράφημα οστών με **Tc99m** MDP **πρίν** (αριστερά) και **μετά** (δεξιά) την σωστή ρύθμιση του ενεργειακού παραθύρου γύρω από τα 140 keV*

Παράμετροι λειτουργίας της γ-κάμερα

Χωρική διακριτική ικανότητα (spatial resolution)

Είναι η ικανότητα να διακρίνει μεταξύ τους **δύο σημειακές** ή **γραμμικές** πηγές ραδιενέργειας.

Η συνολική διακριτική ικανότητα $\mathbf{R_s}$ εξαρτάται από:

- τη διακριτική ικανότητα του κατευθυντήρα $\mathbf{R_c}$
- την εσωτερική διακριτική ικανότητα $\mathbf{R_i}$ σπινθηριστής, φωτοπολλαπλασιαστές
- ηλεκτρονικό σύστημα

$$R_s = \sqrt{R_i^2 + R_c^2}$$

Χρονική διακριτική ικανότητα (temporal resolution)

Είναι η ικανότητα του συστήματος της γ-κάμερα να καταγράφει ως ξεχωριστά γεγονότα, δύο γεγονότα που έχουν **πολύ μικρή χρονική διαφορά**.

Ο ελάχιστος χρόνος που απαιτείται να μεσολαβήσει μεταξύ δύο γεγονότων, για να διακριθούν μεταξύ τους και να καταγραφούν χαρακτηρίζεται ως **νεκρός χρόνος** του συστήματος (**dead time**).

Εάν **N** = πραγματικός αριθμός κρούσεων,

n = παρατηρούμενος αριθμός κρούσεων,

T = νεκρός χρόνος, τότε ισχύει η εξίσωση:

$$N = \frac{n}{1 - nT}$$