



*Φυσικές Αρχές συστημάτων  
PET/CT*

*Ποζιτρονική τομογραφία / Αξονική  
τομογραφία*

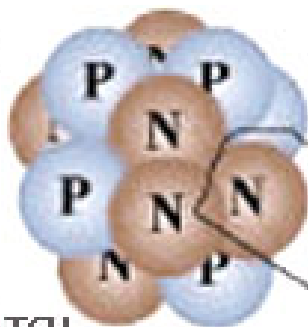
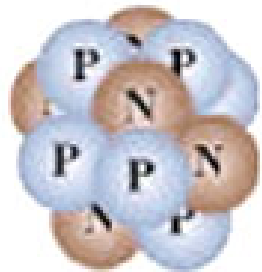
***Για την καλύτερη διερεύνηση του εσωτερικού του σώματος***

***Μαρία Λύρα Γεωργοσοπούλου***

***Πανεπιστήμιο Αθηνών***

Το ποζιτρόνιο ψάχνει για το αντισωματίο του..  
Θα εξαϋλωθεί;

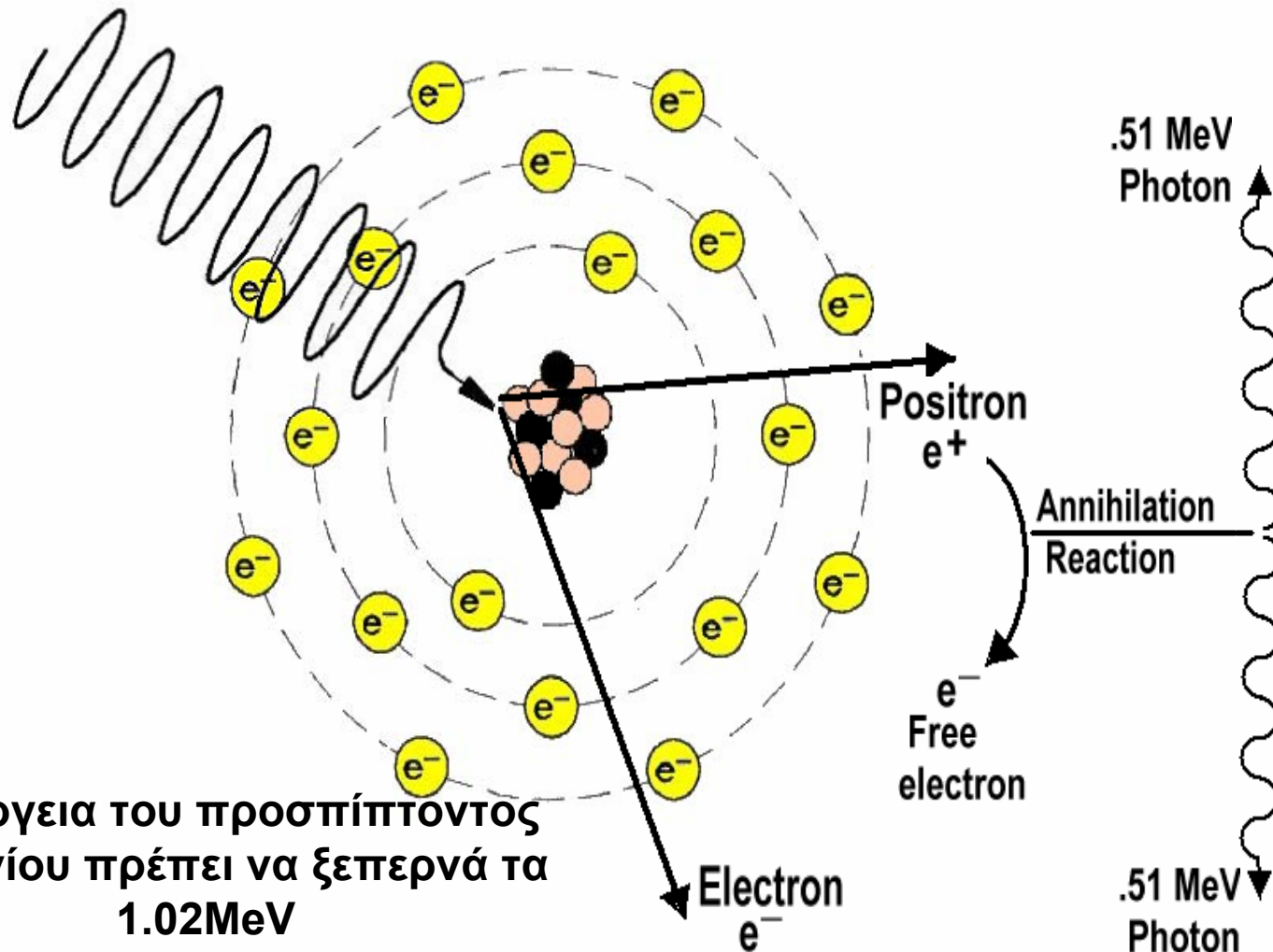
Ασταθής πυρήνας



πρωτόνιο διασπάται  
σε νετρόνιο στον πυρήνα-  
εκπέμπεται **ΠΟΖΙΤΡΟΝΙΟ**  
και νετρίνο

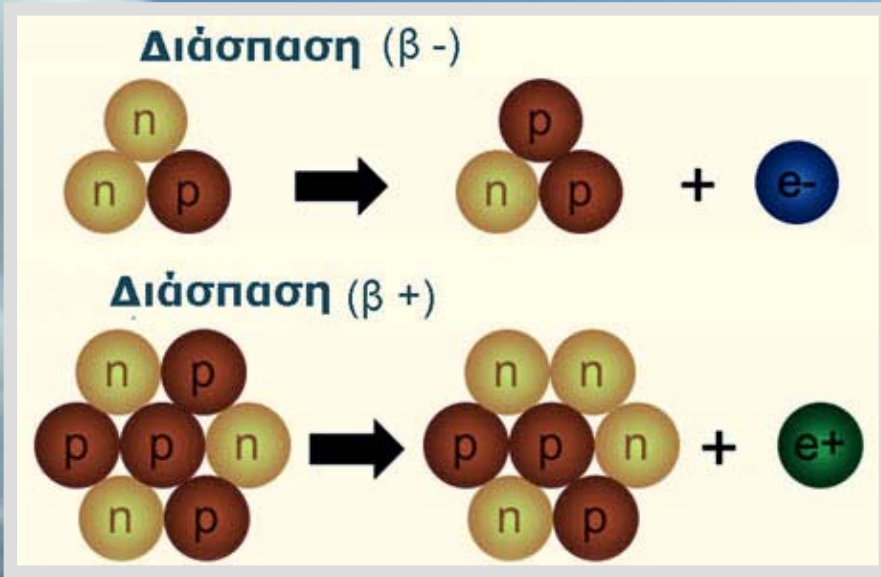


# Δίδυμος γένεση – εξαΰλωση

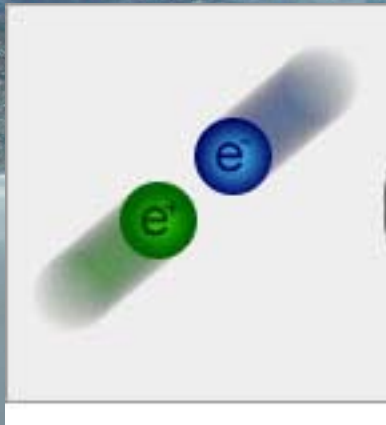


Η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου πρέπει να ξεπερνά τα  $1.02\text{MeV}$

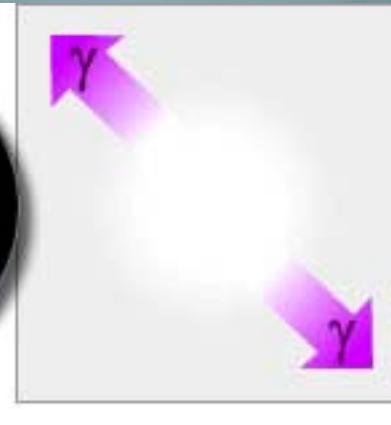
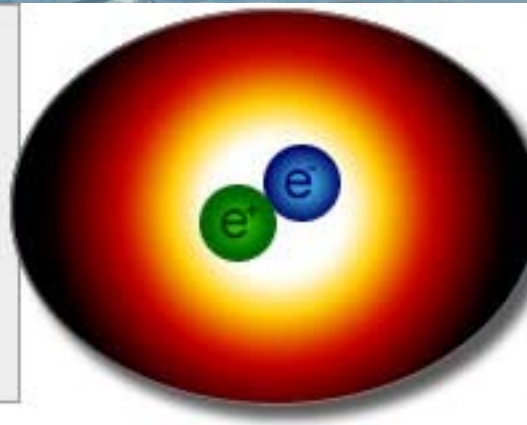
# Εκμεταλλευόμαστε την αστάθεια των πυρήνων..



Διασπάται με εκπομπή ποζιτρονίου



ΣΥΝΑΝΤΗΣΗ  $e^-$  και  $e^+$



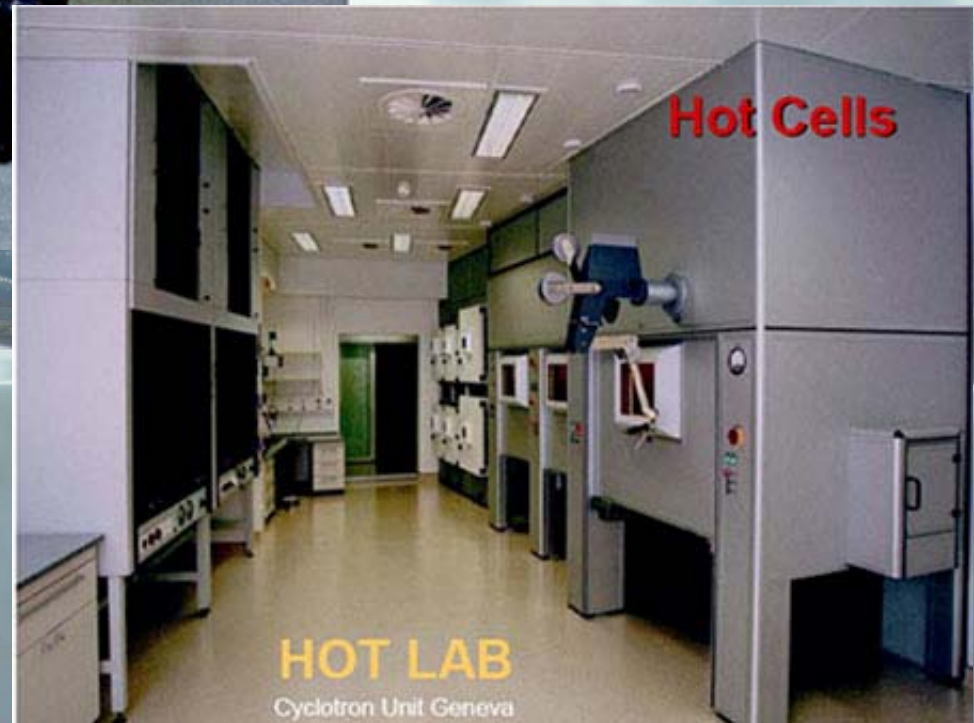
ΕΞΑΥΛΩΣΗ



IBA CYCLONE 18/9  
Cyclotron Unit Geneva

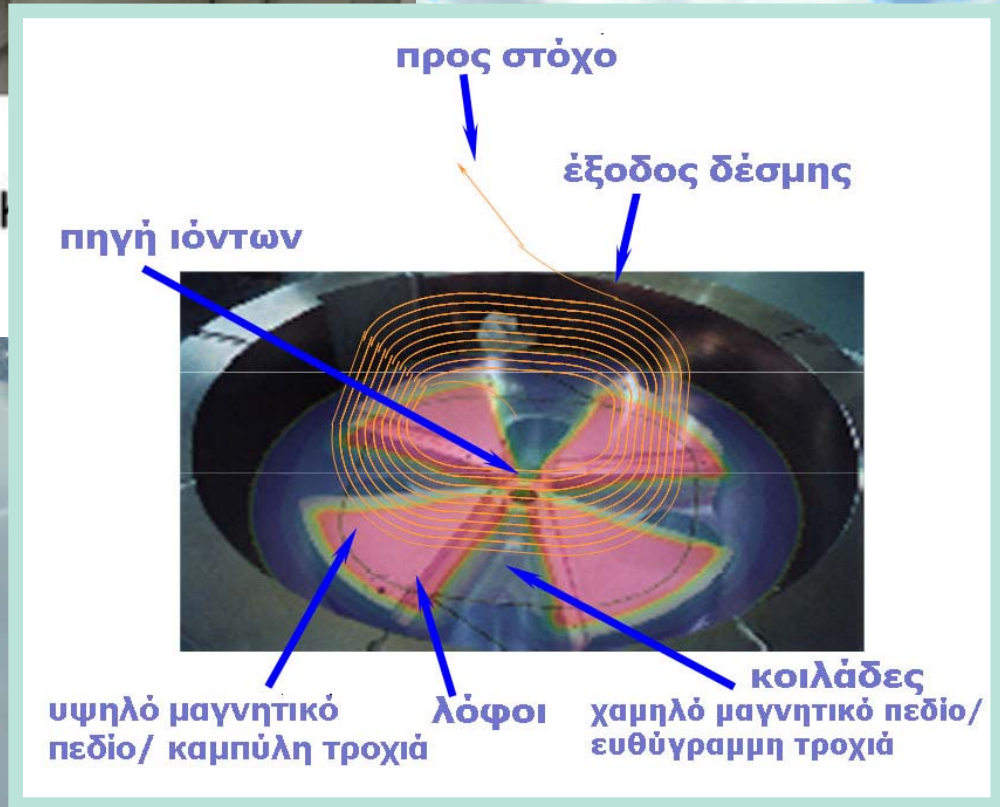
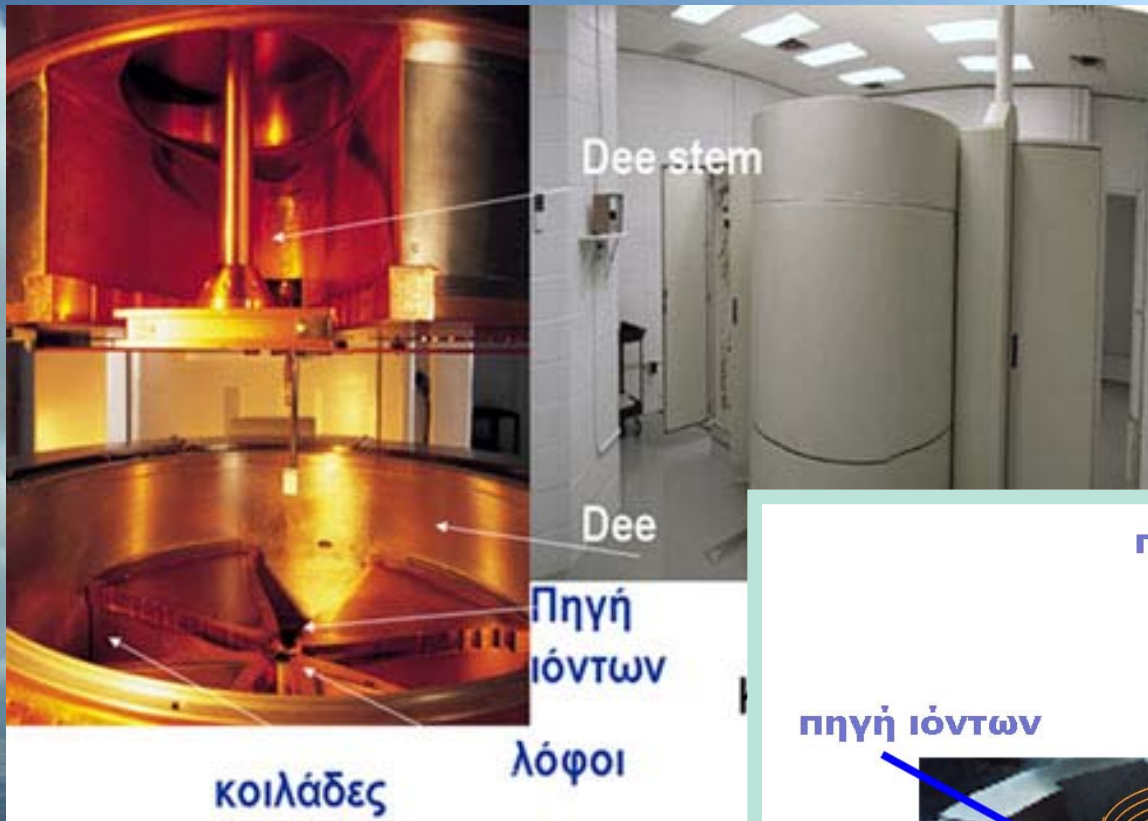
Θερμό εργαστήριο  
για την παραγωγή PET  
ραδιοφαρμάκων

Μονάδα Cyclotron στο  
Πανεπιστημιακό Νοσοκομείο  
της Γενεύης- παραγωγή  
εκπομπών  $\beta^+$



HOT LAB  
Cyclotron Unit Geneva

Επιταχύνσεις Ιόντων  
Παραγωγή β<sup>+</sup> εκπομπών



# Συνήθη Ραδιοϊσότοπα για χρήση με συστήματα PET

Ισότοπο	Half Life	Μεγίστη Ενέργεια (MeV)	Εμβέλεια στο ύδωρ (mm)
F-18	109.7min	0.635	2.39
C-11	20.4min	0.96	4.11
N-13	9.96min	1.19	5.39
O-15	2.07min	1.72	8.2
Rb-82	1,27min	3,150	15,50

## Τα χαρακτηριστικά των Ισοτόπων που χρησιμοποιούνται στην απεικόνιση με PET:

- Οι χρόνοι ημίσειας ζωής είναι κατάλληλοι για την εξέταση και μικροί-ευτυχώς για προστασία.
- Τα ποζιτρόνια μεταφέρουν σχετικά μικρή ενέργεια και επομένως έχουν και μικρή εμβέλεια.
- Παράγονται με υψηλή ειδική ενεργότητα
- Στόχοι παραγωγής ισοτόπων για την PET είναι εύκολα διαθέσιμοι
- Τα ισότοπα είναι ή
  - [1] ταυτόσημα με ουσίες που συναντώνται στο σώμα ή
  - [2] σχετικά όμοια σε μέγεθος όπως το F-18 έτσι ώστε οι σεσημασμένοι ιχνηθέτες είναι εικονικά ταυτόσημοι με τα μη σεσημασμένα μόρια.



# Ραδιοφάρμακα;;

**Από την ένωση ραδιονουκλιδίων εκπομπής ποζιτρονίων, με χημικές ενώσεις, προκύπτουν τα ραδιοφάρμακα χρήσιμα στην PET**

και

- είναι μόρια που λαμβάνουν μέρος στη φυσιολογική λειτουργία του υπό μελέτη οργάνου,
- ή είναι ενώσεις που ελάχιστα διαφέρουν από τα φυσιολογικά μόρια τα συμμετέχοντα στο μεταβολισμό του οργάνου και
- ως ένα στάδιο μεταβολίζονται κατά τον ίδιο τρόπο.

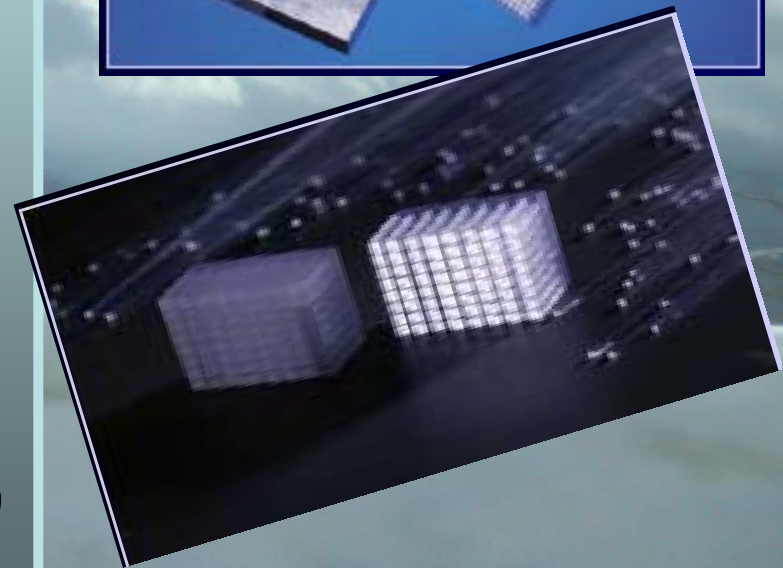
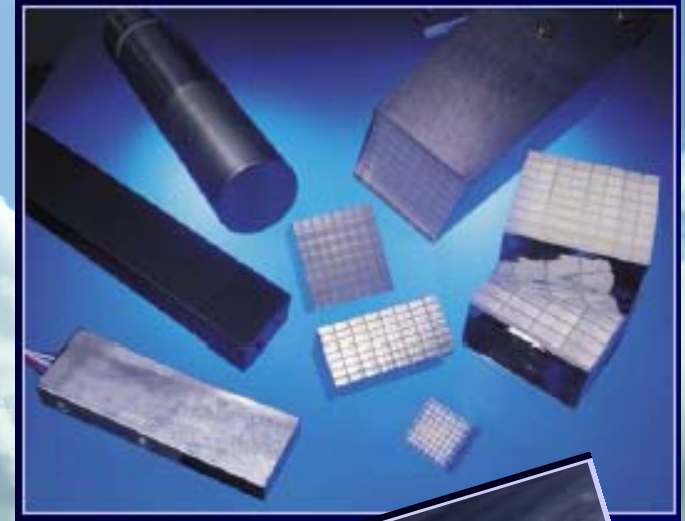
**Πώς θα ανιχνεύσουμε τα ραδιοφάρμακα  
που χορηγήσαμε  
και  
πορεύονται στον οργανισμό του εξεταζομένου  
με βάσει τον μεταβολισμό του;**

*Κρύσταλλοι σπινθηριστές*



# Ποιες ιδιότητες θέλουμε να έχουν οι κρύσταλλοι στην PET;

- Απόδοση ανίχνευσης
- Ταχύτητα σπινθηρισμού  
Οι ταχύτεροι σπινθηριστές μειώνουν τον νεκρό χρόνο  
(*dead time/ Light Decay Time*)
- Σχετικά υψηλή παροχή φωτός
- Δείκτης Διαθλάσεως
- Μεγάλη πυκνότητα- μικρή αυτό-απορρόφηση
- Σκληρότητα (Όχι- εύθραυστο υλικό)
- Μη- υγροσκοπικό υλικό



Ποιοι είναι οι κρύσταλλοι  
που χρησιμοποιούνται στην  
Απεικόνιση με PET;

✓ **NaJ(Tl)** αρίστη απόδοση φωτός & Ενεργειακή Διακριτική Ικανότητα

✓ **BGO** αρίστη stopping power  
(καθορίζει την απόσταση που το φωτόνιο θα σταματήσει με πλήρη εναπόθεση της ενέργειας του) Εξαρτάται από την πυκνότητα και τον ενεργό ατομικό αριθμό του υλικού

✓ **LSO & LYSO** μεγάλη απόδοση φωτός & ταχεία απόσβεση φωτός. Περίπου όμοια πυκνότητα και ενεργό ατομικό αριθμό με τον BGO.

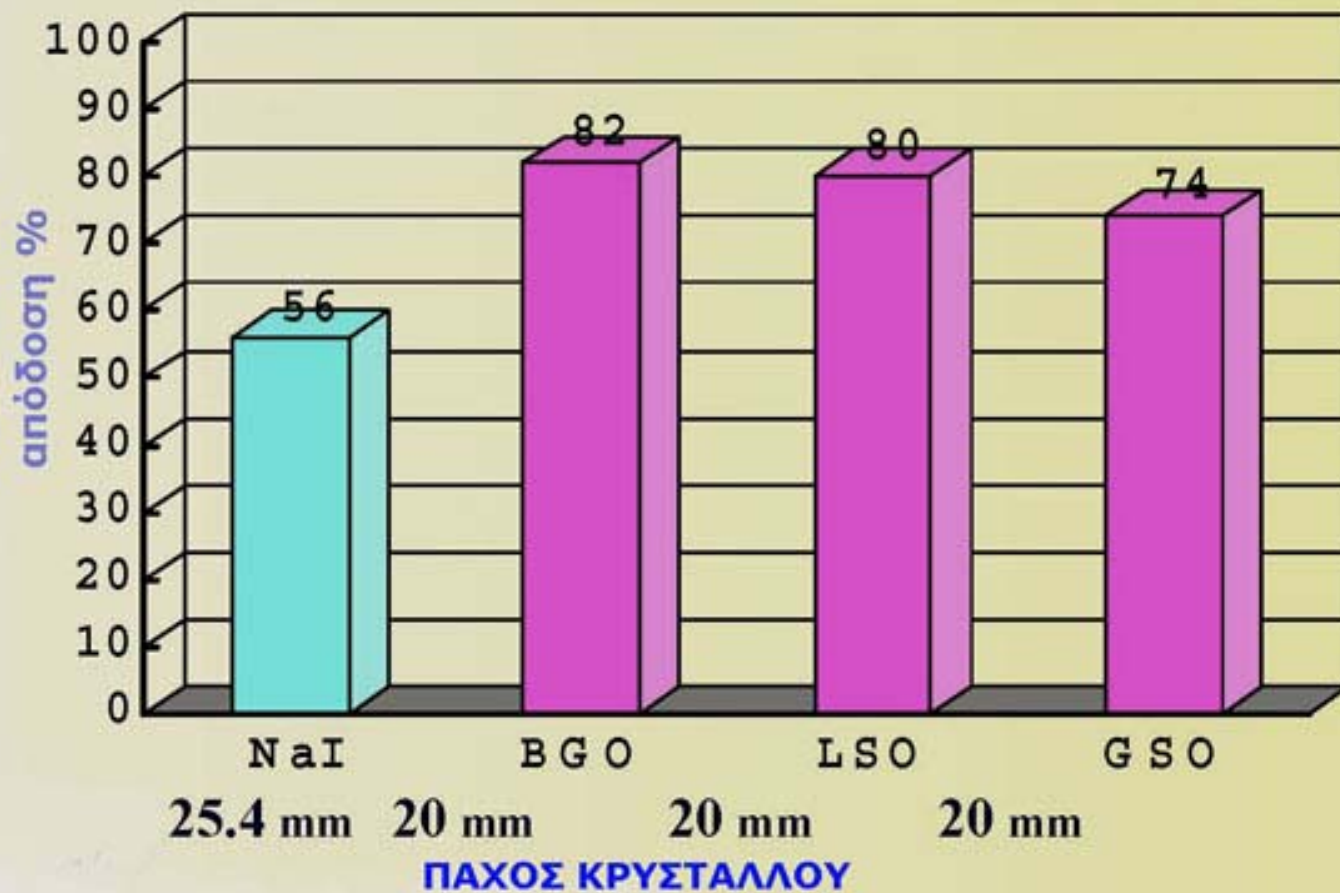
✓ **GSO** Καλή Ενεργειακή Διακριτική Ικανότητα  
όμοιο συντελεστή απόσβεσης φωτός με LSO & LYSO

✓ **LaBr** Αρίστη Ενεργειακή Διακριτική Ικανότητα και ταχύτατη απόσβεση φωτός  
*Προτείνεται για TOF (time-of-flight) PET*

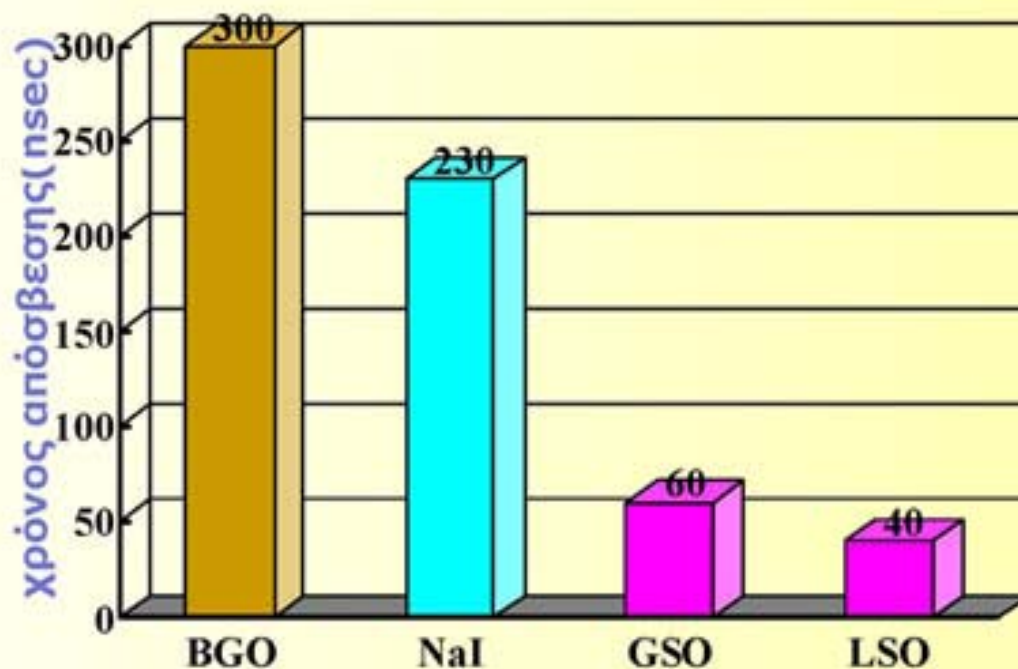
# Τι χαρακτηρίζει τους κρυστάλλους στην PET;

ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΙ	NaI (TI)	BGO	LSO	GSO
<b>ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ</b>				
<b>Ενεργός Ατομικός αριθμός (Z)</b>	51	74	66	59
<b>Γραμμικός συντελεστής εξασθένησης (<math>\text{cm}^{-1}</math>)</b>	0.34	0.92	0.87	0.62
<b>Δείκτης Διάθλασης</b>	1.85	2.15	1.82	1.85
<b>Απόδοση φωτός [%NaI (TI)]</b>	100	15	75	41
<b>Μήκος κύματος κορυφής (nm)</b>	410	480	420	430
<b>Σταθερά διάσπασης (nS)</b>	230	300	40	56

## ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΤΩΝ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΝ ΣΤΗΝ PET

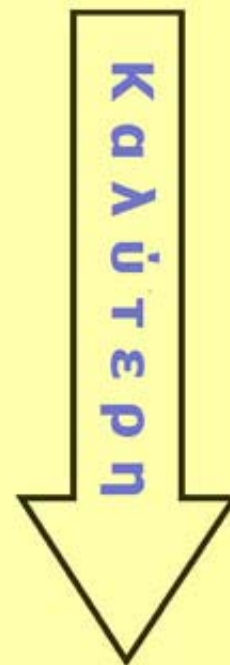
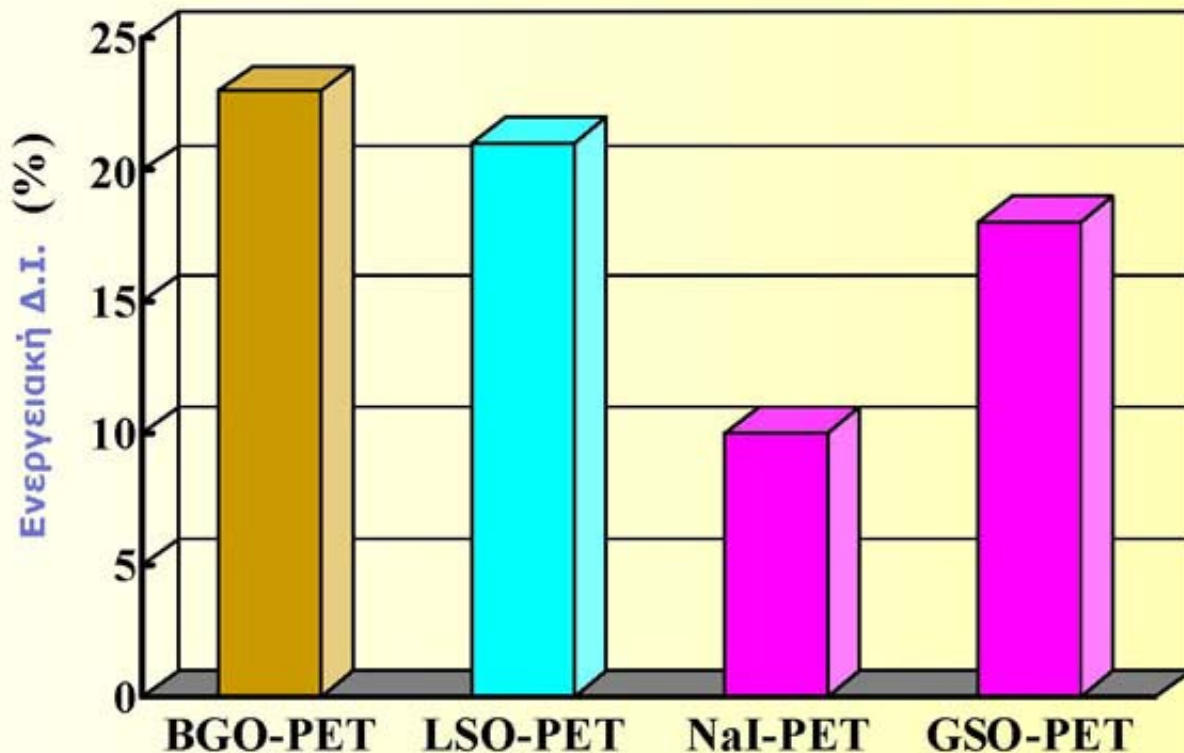


## Σύγκριση σπινθηριστών ως προς την ταχύτητα



Οι ταχύτεροι σπινθηριστές μειώνουν τον νεκρό χρόνο

## ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ





Σε ποια μορφή βρίσκονται οι κρύσταλλοι στα συστήματα PET;

Χρησιμοποιείται μεγάλος αριθμός μικρών κρυστάλλων 4-8mm (διατομές 4x4, 4x6, 6x6, 4x8 κλπ και βάθος 20-30 mm)

❖ Οι ανιχνευτές οργανώνονται σε blocks

π.χ. μια ομάδα 8x8 κρυστάλλων αντιστοιχούν σε 2x2 φωτοπολλαπλασιαστές (PMTς)

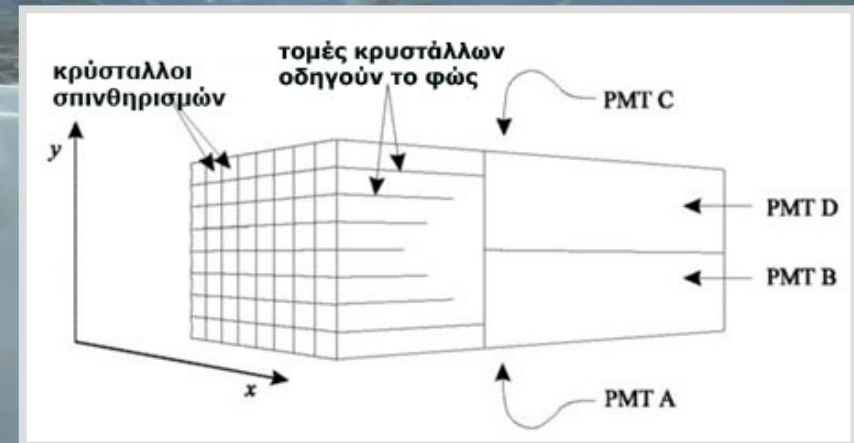
❖ ~100 blocks σχηματίζουν έναν δακτύλιο ανιχνευτών

❖ Το σύστημα έχει 3-4 πλήρεις δακτυλίου

Προκύπτει αξονικό πεδίο του συστήματος 15-18cm

12000- 18000 κρύσταλλοι απαιτούνται στην κατασκευή PET

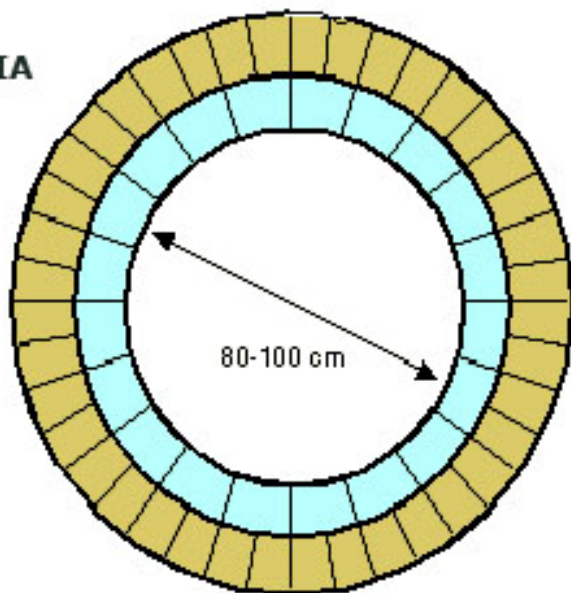
Ο μεγάλος αριθμός κρυστάλλων & η πολύπλοκη κατασκευαστική σύνθεση αυξάνουν το κόστος των PET συστημάτων



# Δακτύλιος: κατευθυντήρες (septa) ανιχνευτές - φωτοπολλαπλασιαστές

## ΔΑΚΤΥΛΙΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΜΩΝ ΡΕΤ

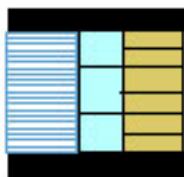
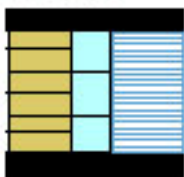
ΕΓΚΑΡΣΙΑ  
ΤΟΜΗ






80-100 cm

ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΟΜΗ

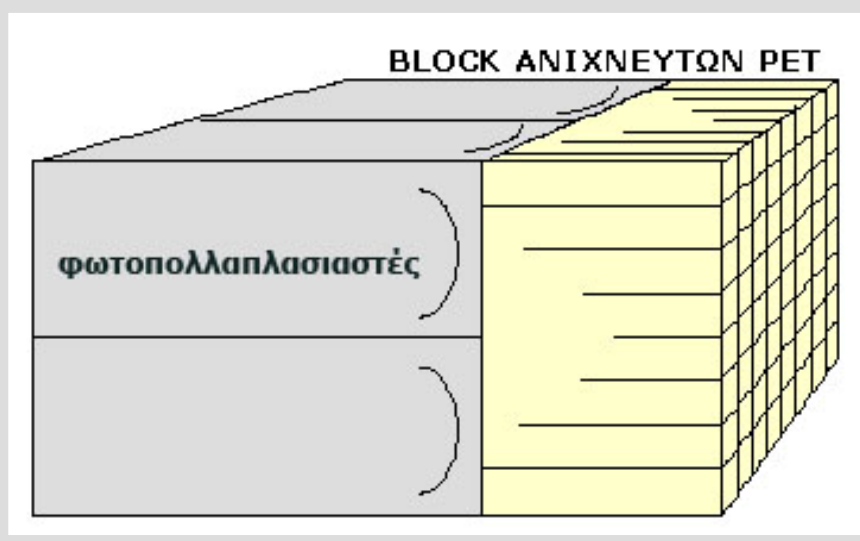
10-15 cm



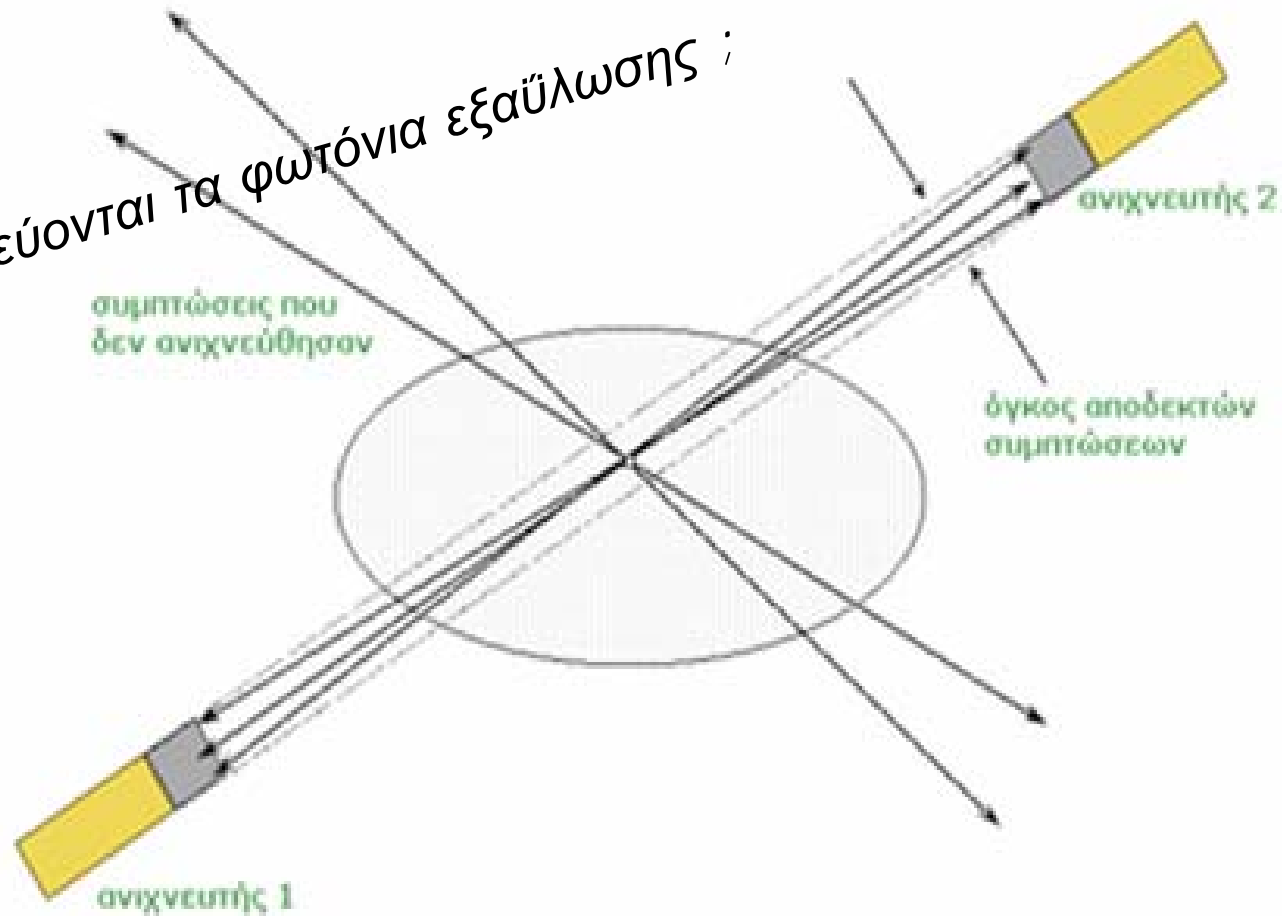
-  Ανιχνευτές
-  Φωτοπολλαπλασιαστές ΡΜΤς
-  κατευθυντήρες



LSO BLOCK Ανιχνευτής

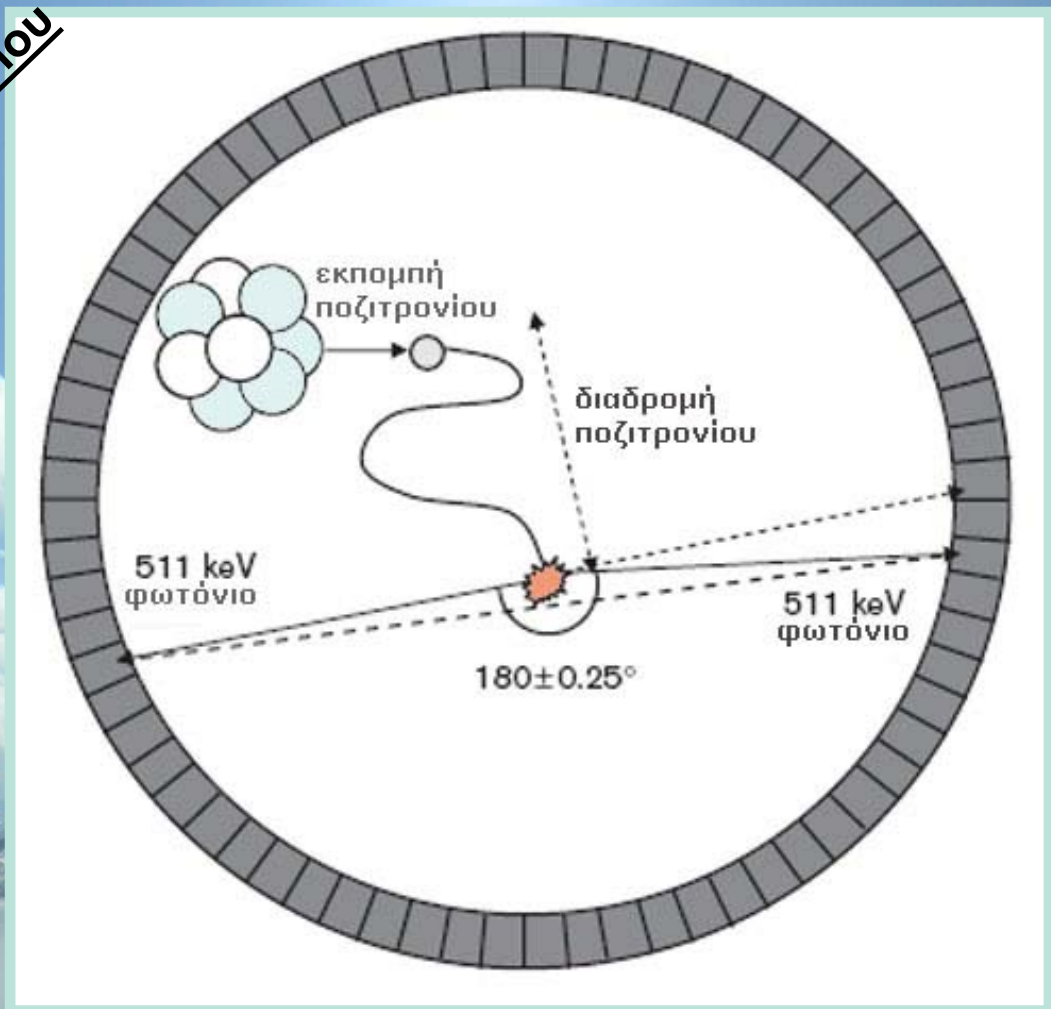


Πως ανιχνεύονται τα φωτόνια εξαΰλωσης ;



Ένα ζεύγος ανιχνευτών σε  $180^\circ$  αντιπαράθεση λειτουργεί σε τεχνική σύμπτωσης (coincidence)  
Οι πεπερασμένες διαστάσεις των ανιχνευτών καθορίζουν τον όγκο των αποδεκτών γραμμών απόκρισης (LOR)

**Απόκλιση της διαδρομής του ποζιτρονίου**

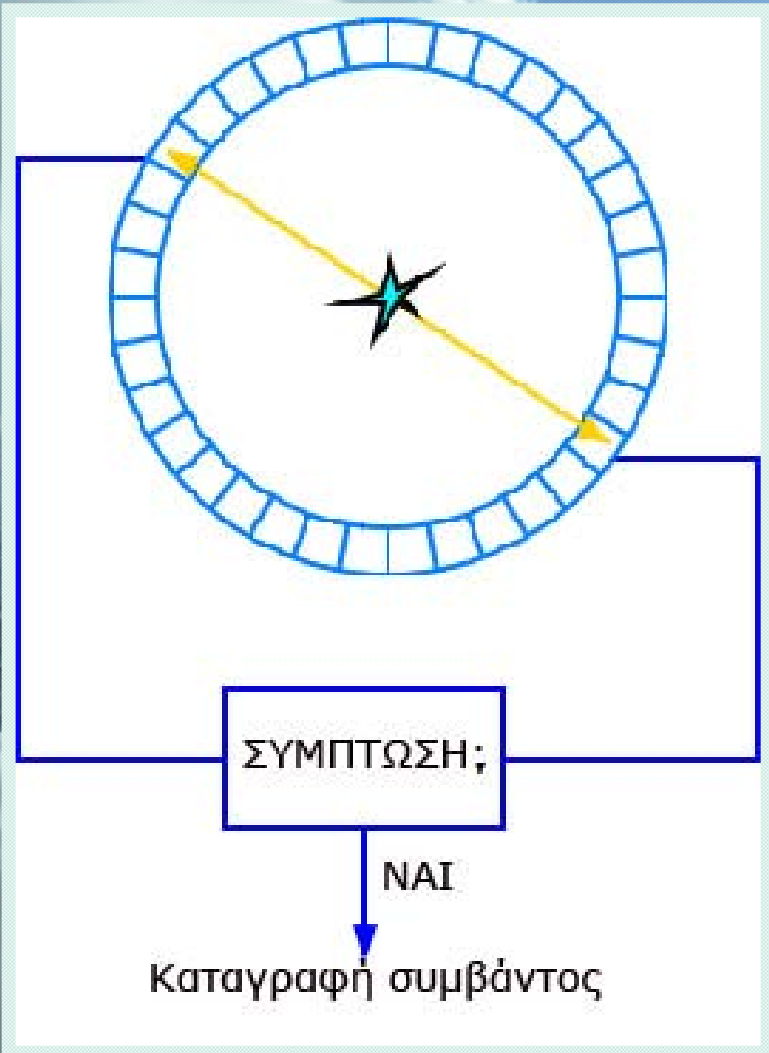


**Η πεπερασμένη διαδρομή του ποζιτρονίου και η μη παράλληλη διαδρομή των φωτονίων στην διαδικασία εξαΰλωσης ποζιτρονίου- ηλεκτρονίου προκαλούν μία εγγενή ανακρίβεια θέσης.**

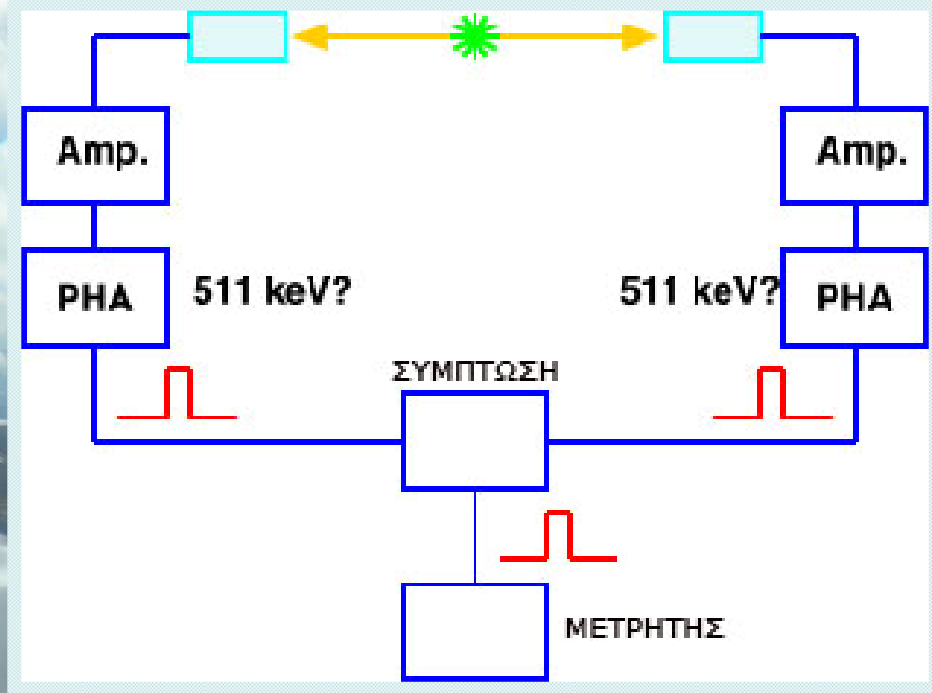
**(Το ζεύγος ποζιτρονίου- ηλεκτρονίου διατηρεί μικρή υπολειπόμενη ορμή) με αρνητική επίδραση στην διακριτική ικανότητα του συστήματος (Δ.Ι)**

# Ηλεκτρονικό σύστημα καταγραφής και διεκρίνισης των συμπτώσεων

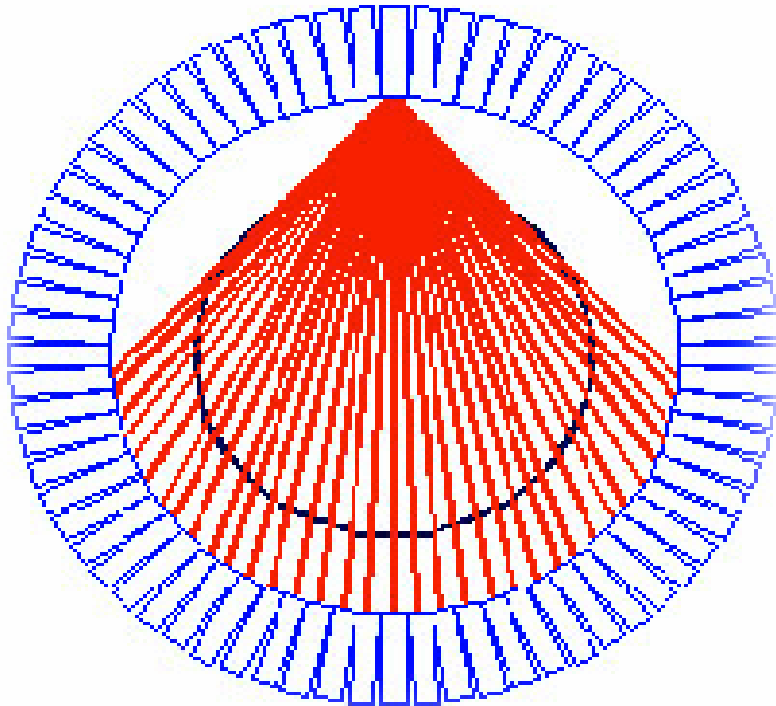
## PET-ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΣΥΜΠΤΩΣΗΣ



## PET- ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΥΜΠΤΩΣΗΣ διεκρινιστής



## Πεδίο συμπτώσεων (Fan beam FOV) και γραμμές απόκρισης (LOR)

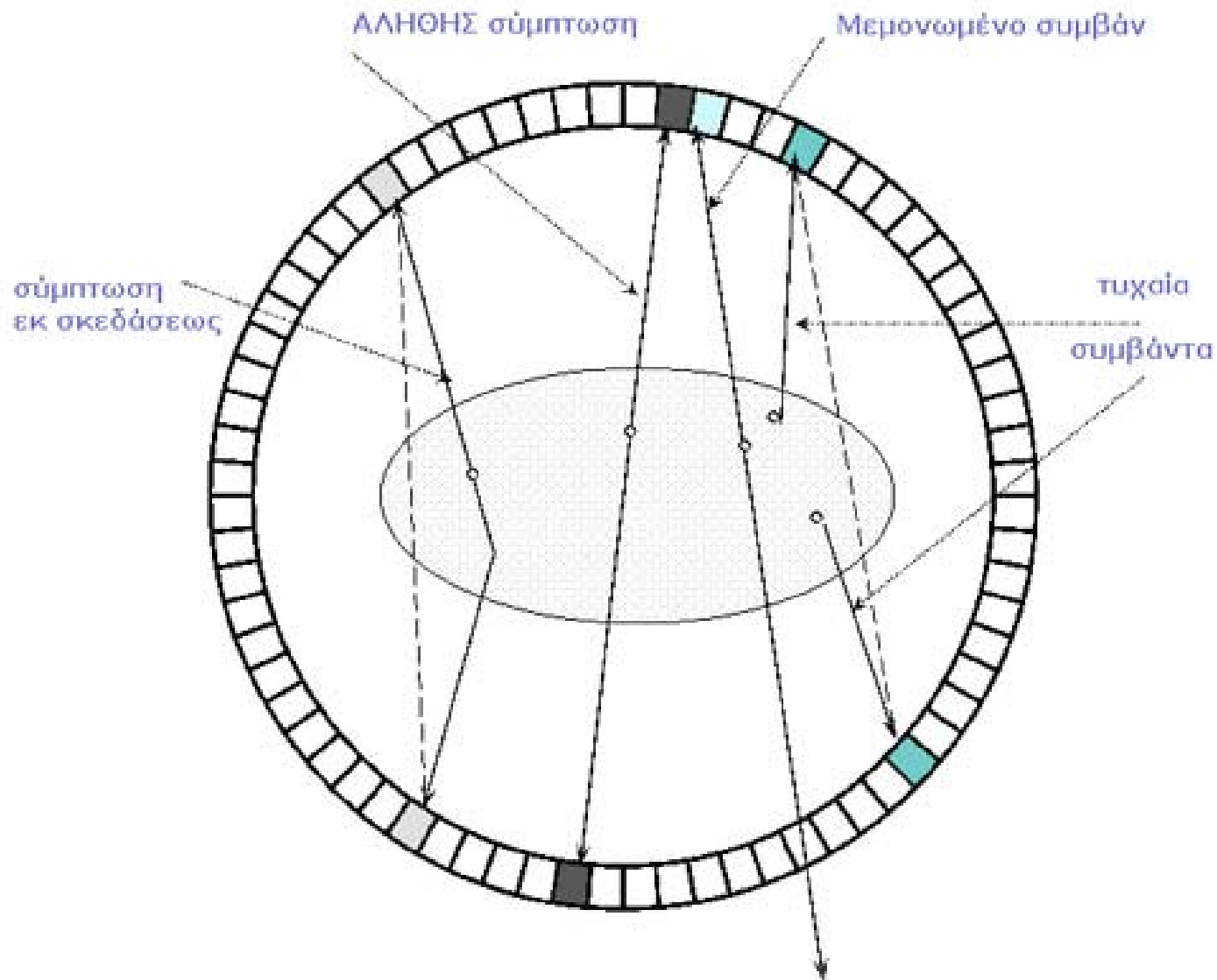


Κάθε στοιχείο ανιχνευτού συνδέεται με κύκλωμα σύμπτωσης και χρονικό παράθυρο με τους απέναντι ανιχνευτές του δακτυλίου

Τα δεδομένα καταγράφονται σε προβολή βεντάλιας

Ολες οι δυνατές λήψεις στην δέσμη βεντάλιας για όλους τους ανιχνευτές καθορίζουν το πεδίο συμπτώσεων FOV

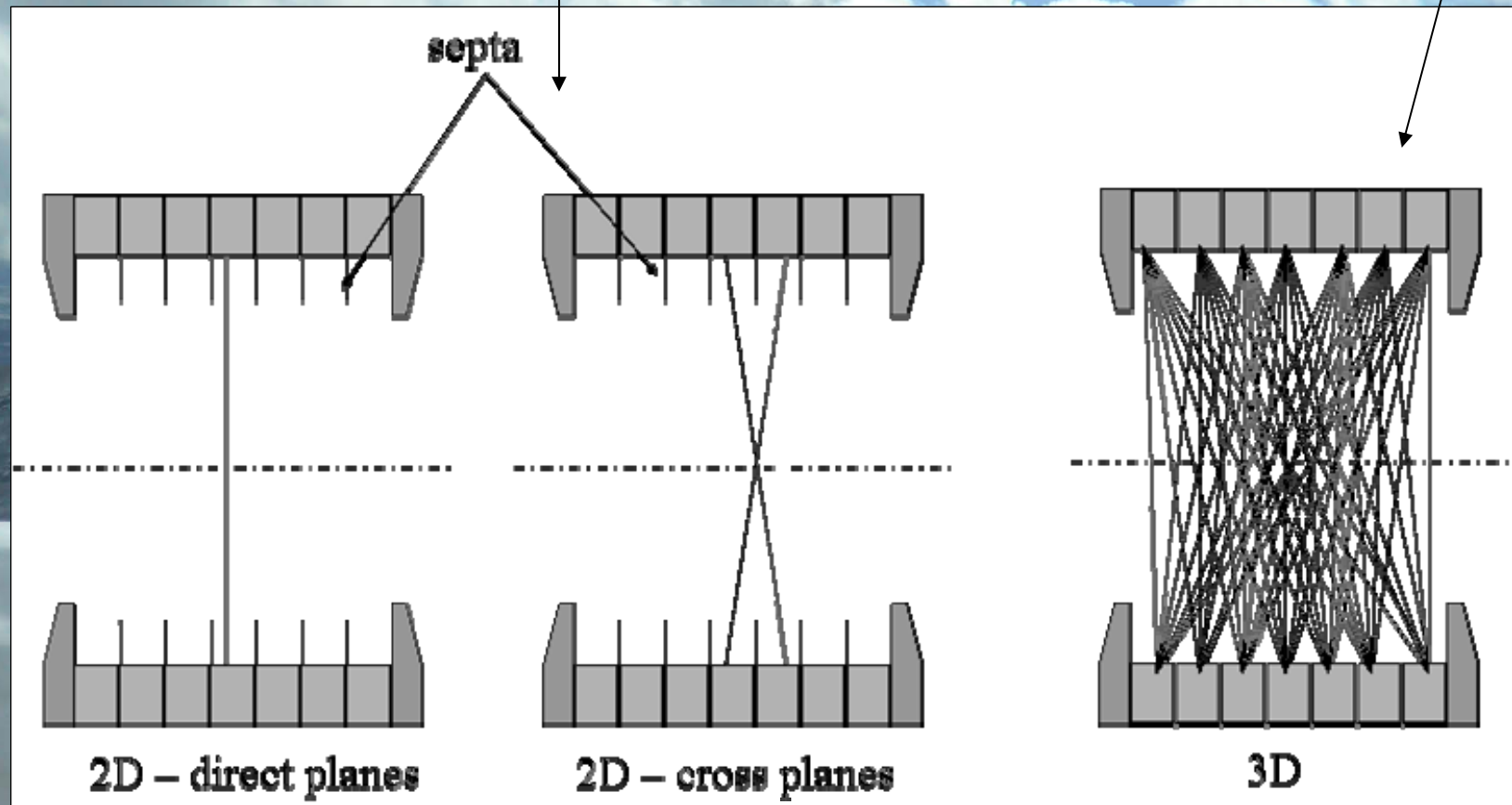
# Ποια Συμβάντα ανιχνεύονται από ένα PET σύστημα;



## Καταγραφή 2D ή 3D;

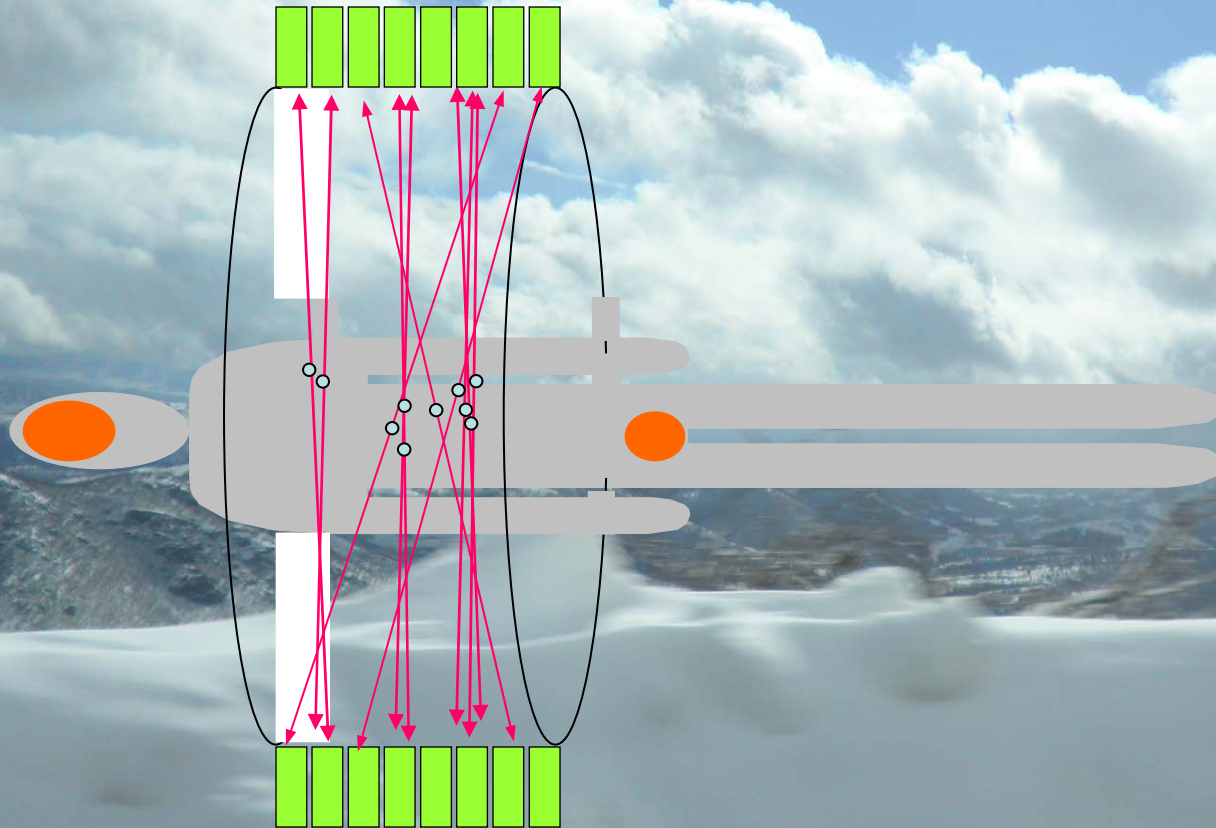
2D : χρησιμοποιούνται κατευθυντήρες μολύβδου ή βολφραμίου (septa) για τον διαχωρισμό των ανιχνευτών γειτονικών δακτυλίων

3D : αν αποσυρθούν τα septa καταγράφονται δεδομένα πρόσληψης απ' όλες τις πιθανές γωνίες σε 3 διαστάσεις



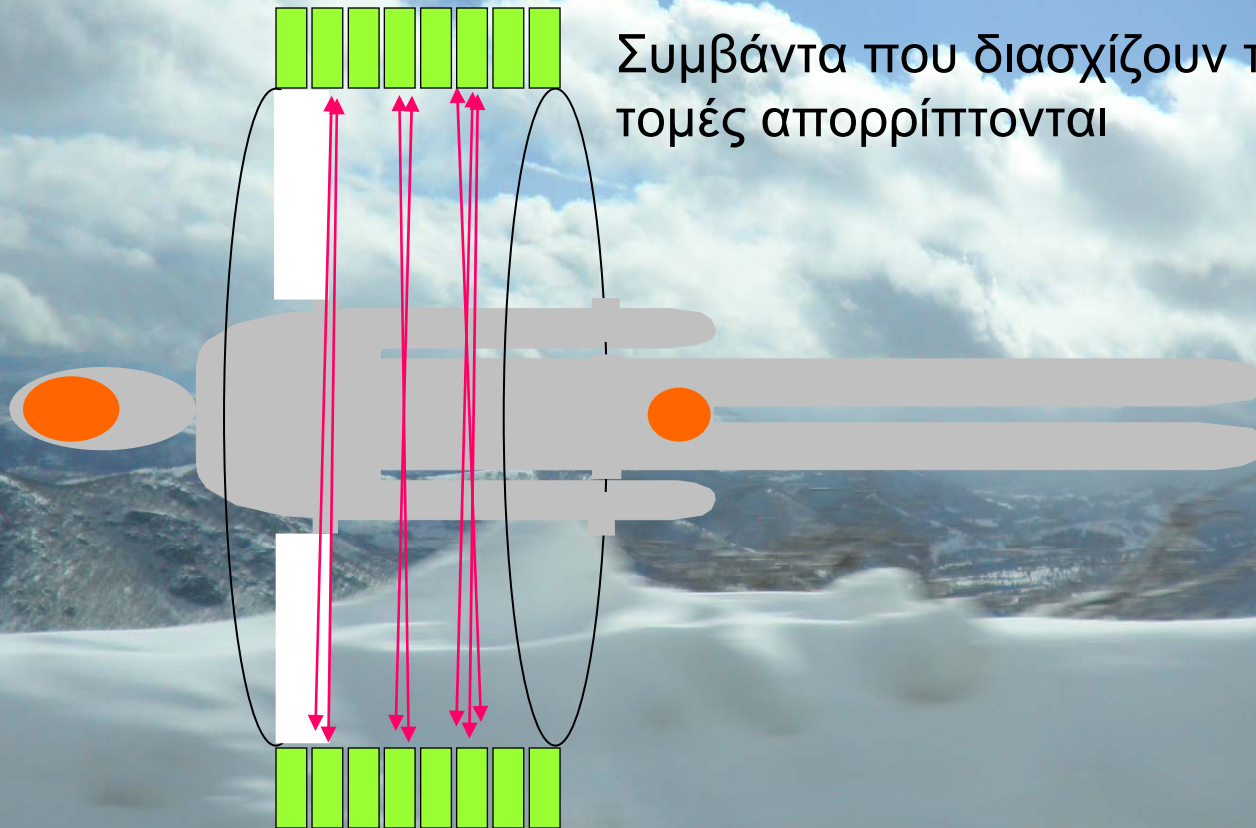


Ποιος είναι όμως ο καλύτερος τρόπος για να καταγράψεις τις πληροφορίες με την PET;



# 2D καταγραφή

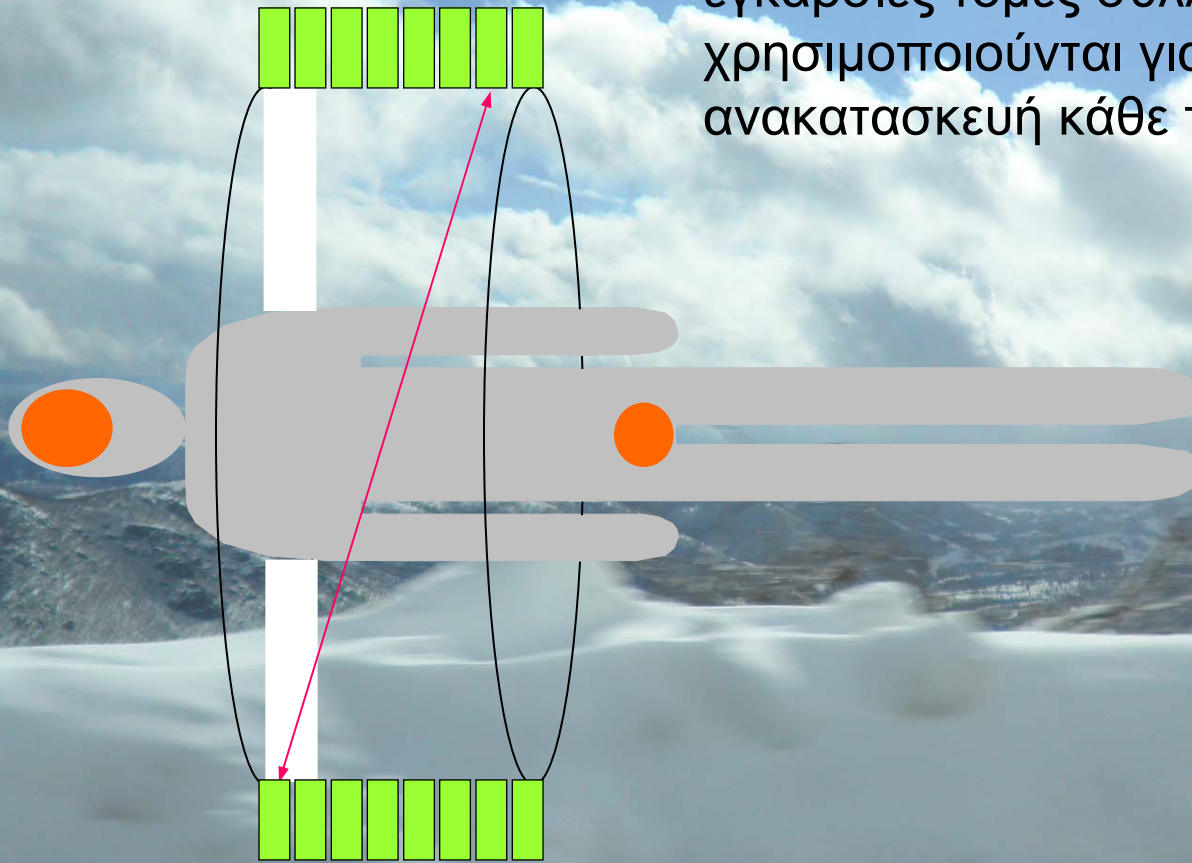
Όλα τα συμβάντα που χρησιμοποιούνται στην ανακατασκευή μιας τομής ανιχνεύονται μόνον μέσα από αυτήν.



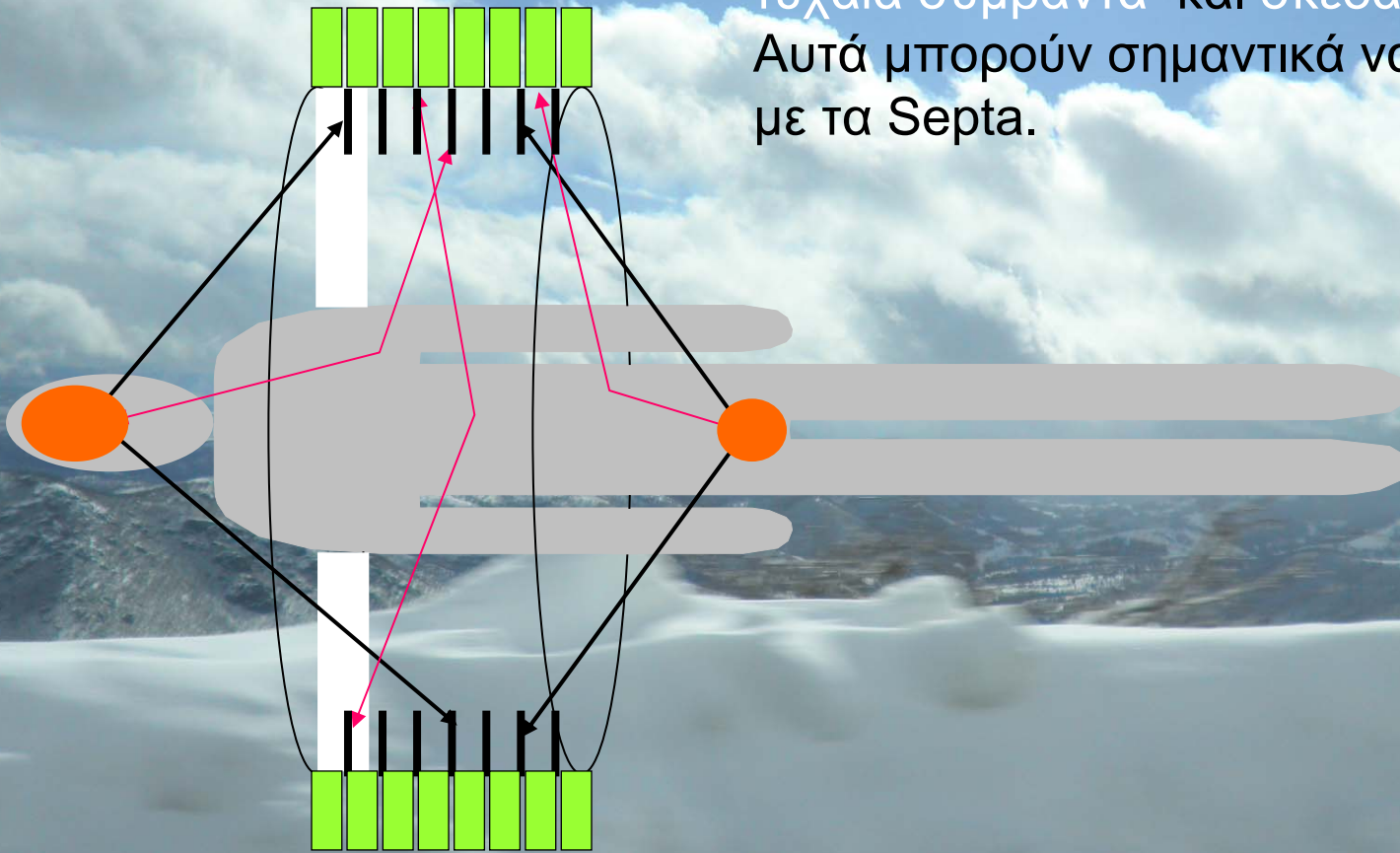
Συμβάντα που διασχίζουν περισσότερες τομές απορρίπτονται

# 3D καταγραφή

Όλα τα συμβάντα που διασχίζουν εγκάρσιες τομές συλλέγονται. Αυτά χρησιμοποιούνται για την ανακατασκευή κάθε τομής

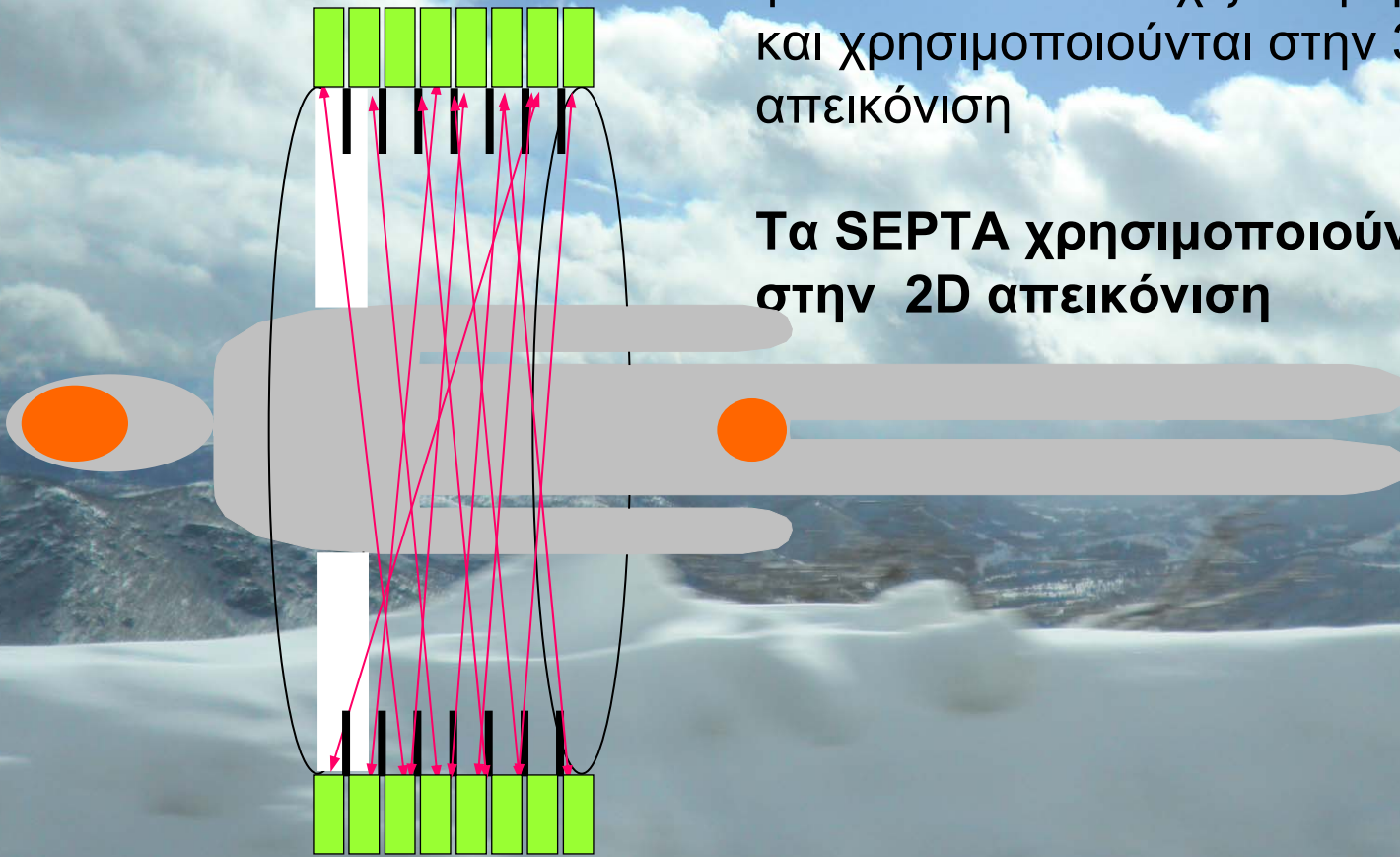


Αλλά ο κόσμος στην PET είναι γεμάτος  
τυχαία συμβάντα και σκεδάσεις.  
Αυτά μπορούν σημαντικά να μειωθούν  
με τα Septa.



Αλλά τα Septa αφαιρούν επίσης φωτόνια που διασχίζουν μερικές τομές και χρησιμοποιούνται στην 3D απεικόνιση

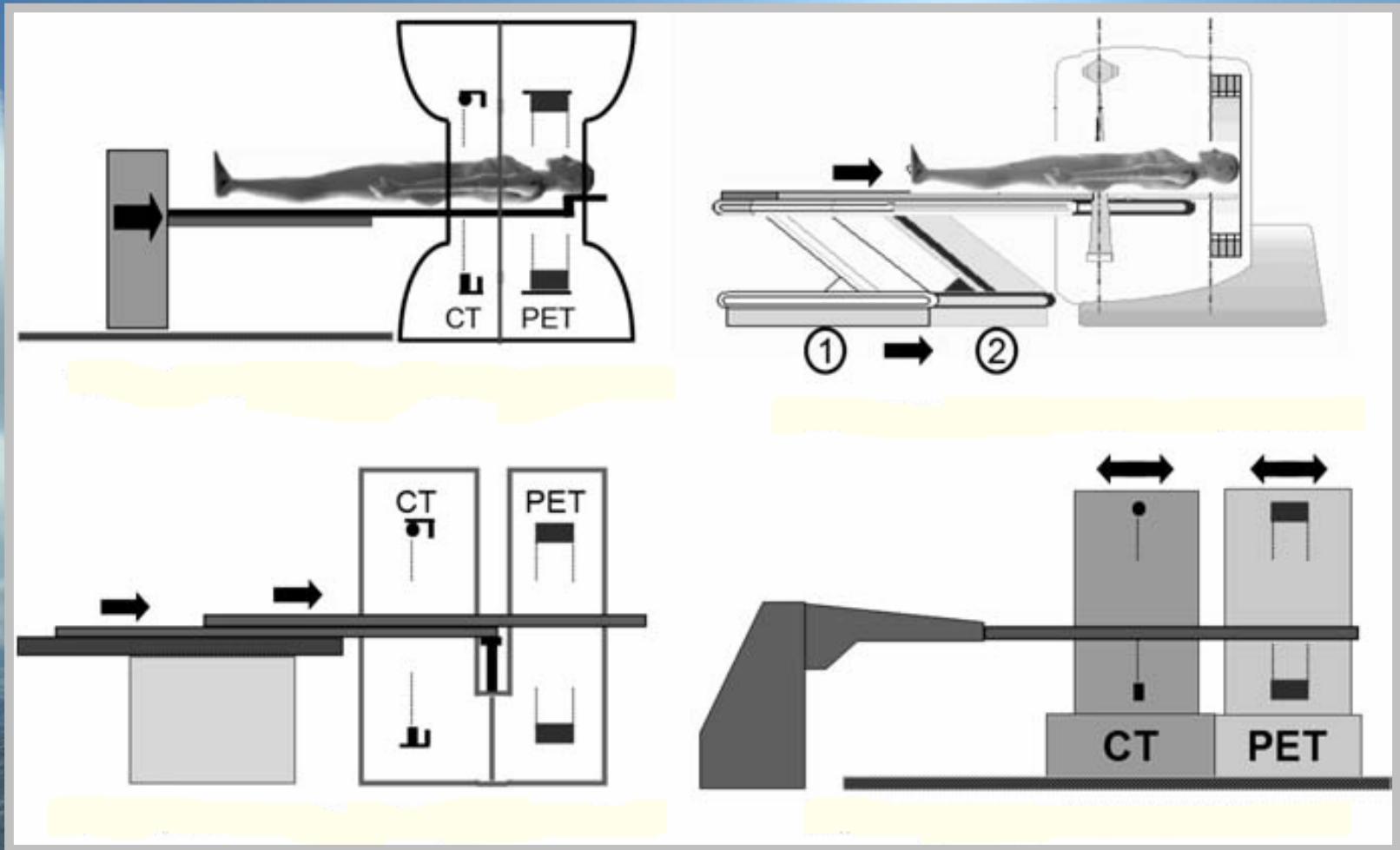
Τα SEPTA χρησιμοποιούνται μόνον στην 2D απεικόνιση



Συνεργασία με τον Αξονικό Τομογράφο (CT) – Ενώσαμε τα 2 συστήματα για καλύτερα αποτελέσματα

## Συνένωση εικόνων; Γιατί;

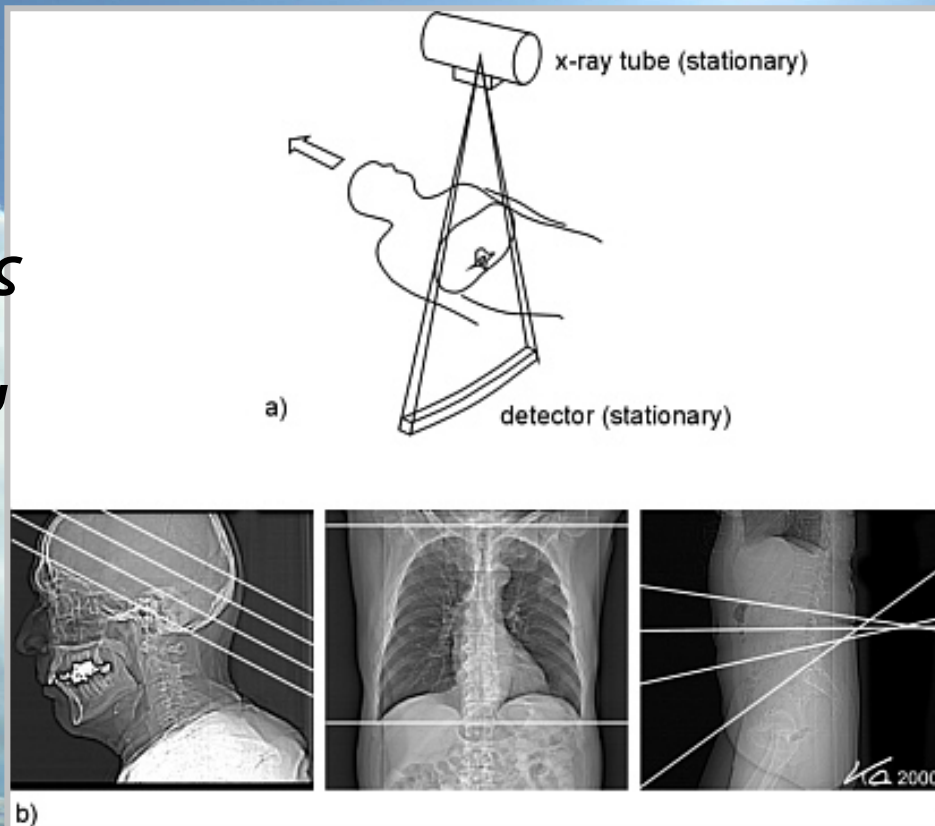
- ✓ Ακριβής εντοπισμός βλαβών
- ✓ Αυξημένη αξιοπιστία της διάγνωσης
- ✓ Αυξημένη ακρίβεια ανατομικών στοιχείων
- ✓ μείωση χρόνου & κόστους από σχετικές επαναλαμβανόμενες εξετάσεις
- ✓ Διόρθωση εξασθένησης στις ποζιτρονικές εικόνες ταχύτερα



## Γραφικές παραστάσεις συστημάτων PET/CT

Διαφορετικές λύσεις για το σύστημα μετακίνησης του ασθενούς, που ελαχιστοποιούν κατακόρυφες αποκλίσεις τις τράπεζας κατά την μετακίνηση της

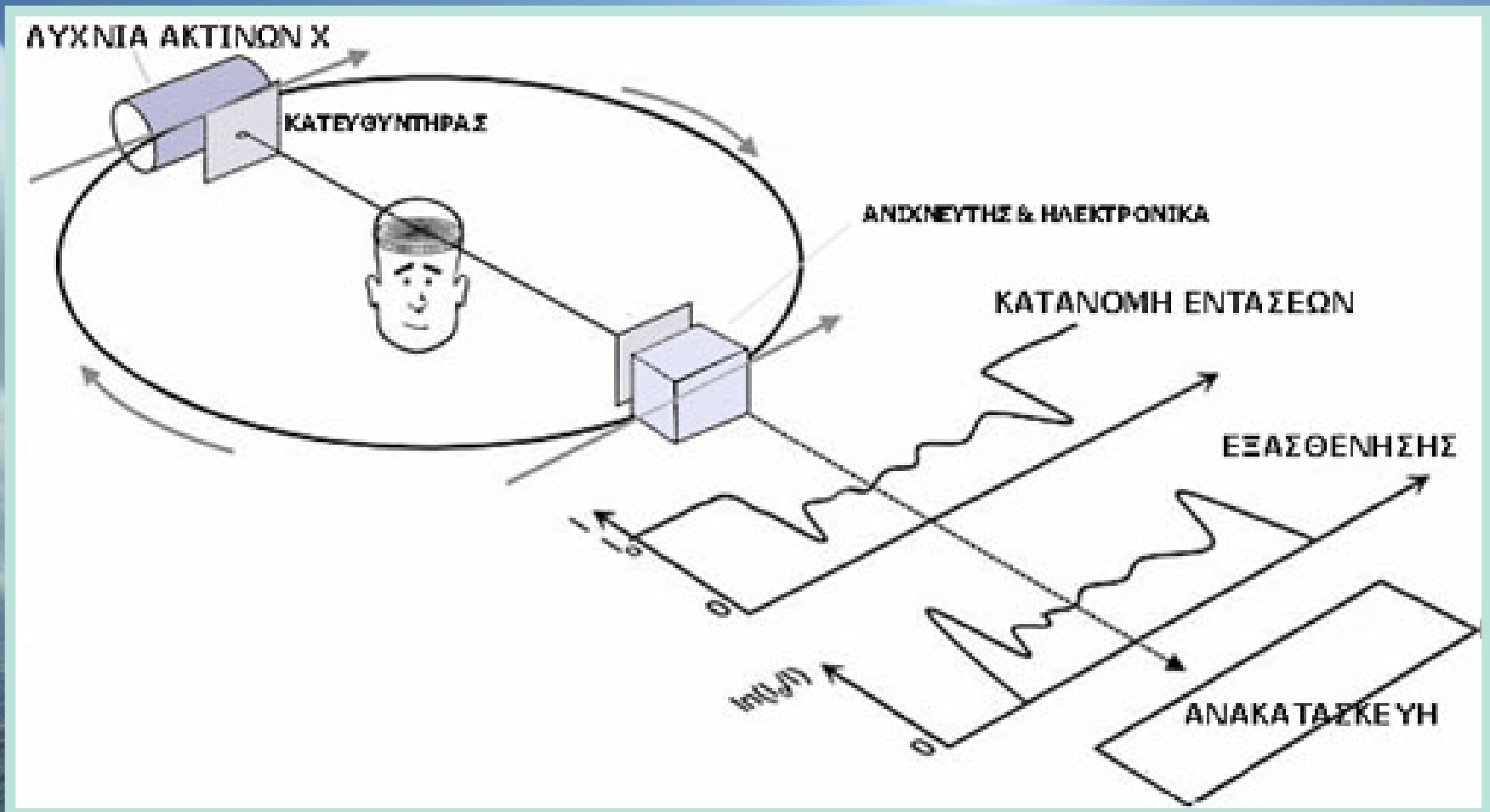
## Εναρξη λήψης εικόνων εξεταζομένου



Λήψη **Ακτινογραφίας ανίχνευσης (scout scan)** με μικρή δόση και κακή διακριτική ικανότητα μεταφέροντας τον εξεταζόμενο στο πεδίο μετρήσεων με την λυχνία ακτίνων  $-X$  σε σταθερή θέση. (a). Η διεύθυνση της προβολής είναι συνήθως αυθαίρετη

Οι ανιχνευτικές ακτινογραφίες επιτρέπουν την επιλογή της θέσης και της κλίσης του gantry για την επιλογή μεμονωμένων τομών ή ολόκληρης περιοχής σάρωσης (b)





*Διάγραμμα δημιουργίας κατανομής εξασθένησης (attenuation profile) στην σάρωση με CT.*

*Τα σημερινά συστήματα χρησιμοποιούν δέσμη βεντάλιας για την δημιουργία της κατανομής εξασθένησης σε μία έκθεση.*

## Τι απεικονίσεις μπορούμε να πάρουμε από το υβριδικό σύστημα PET/CT;



Οι εικόνες παρουσιάζονται και προβάλλονται σε 3 επίπεδα:  
Εγκάρσιες – προσθιοπίσθιες-πλάγιες τομές ή ακόμη  
3D προβολές μεγίστης έντασης (M.I.P.), με δυνατότητα περιστροφής.

Οι εικόνες CT, οι διορθωμένες για την εξασθένηση (Attenuation Correction) , οι PET εικόνες χωρίς διόρθωση, καθώς και η αθροιστική εικόνα PET/CT προβάλλονται στην ίδια οθόνη

# Αλλά στο PET/CT καταγράφονται και ψευδείς πληροφορίες (artifacts)

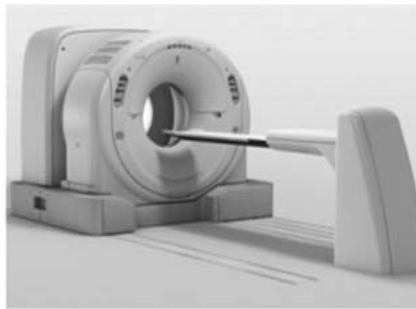
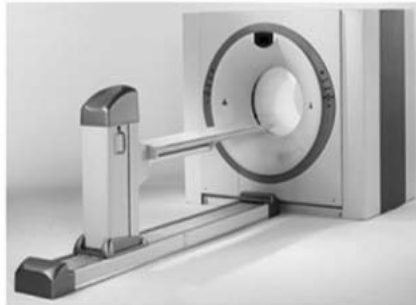
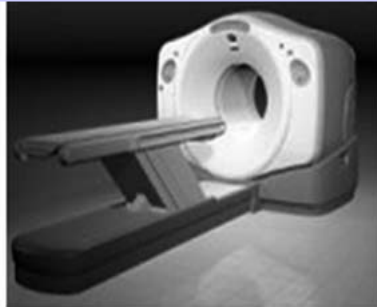
λόγω

- Διόρθωσης της εξασθένησης
- Της χρήσης σκιαγραφικού
- πιθανού βηματοδότη του ασθενούς
- Κίνησης του ασθενούς ή οργάνου
- Κακής ευθυγράμμισης των εικόνων
- αναπνοής

## Ένα παράδειγμα ψευδούς πληροφορίας (artifact)

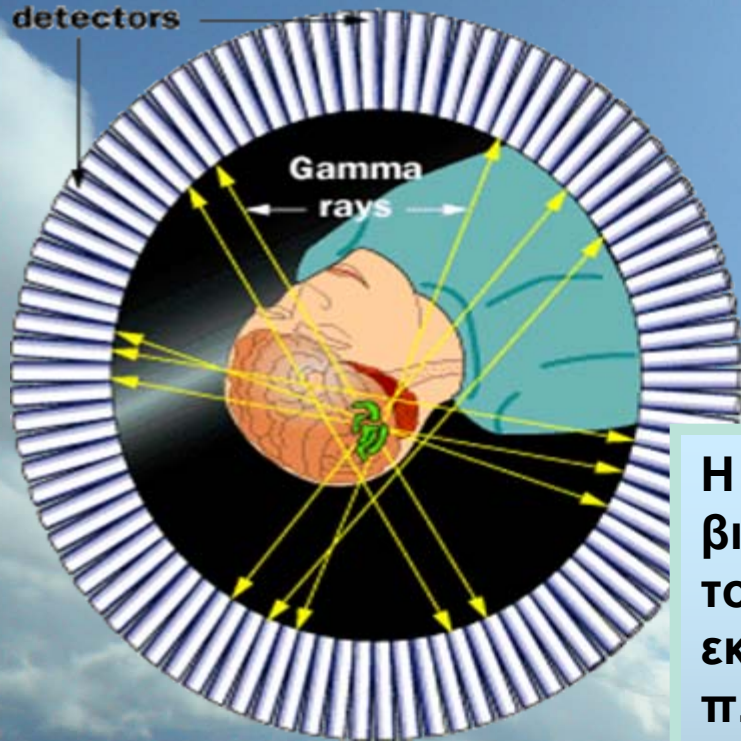


**50% των PET/CT απεικονίσεων παρουσιάζουν artifacts αναπνοής κοντά στο διάφραγμα. Αυτά τα artifacts οφείλονται στην κακή ευθυγράμμιση CT και PET σαρώσεων λόγω της διαφορετικής χρονικής διακριτικής ικανότητας.**



Σύγχρονα συστήματα  
PET/CT

Gamma ray  
detectors



Με δυό λόγια:

Η PET απεικονίζει την ροή του αίματος και βιοχημικές λειτουργίες ανάλογα με τον τύπο του μορίου που σημαίνεται με το ραδιενεργό β<sup>+</sup> εκπομπό.

π.χ. Η PET δίδει εικόνες του μεταβολισμού της γλυκόζης στον εγκέφαλο, και άλλα μέρη του σώματος.

Η PET πρέπει να βρίσκεται κοντά σε κυκλοτρόνιο που παράγει τα πολύ μικρού χρόνου ημιζωής ραδιοϊσότοπα που χρησιμοποιούνται σ' αυτή την τεχνική.

Με την ενσωμάτωση του CT επιτυγχάνεται ταχεία διόρθωση της εξασθένησης και προστίθενται ανατομικές πληροφορίες

***Μπορούμε χωρίς την PET; σήμερα ;***

