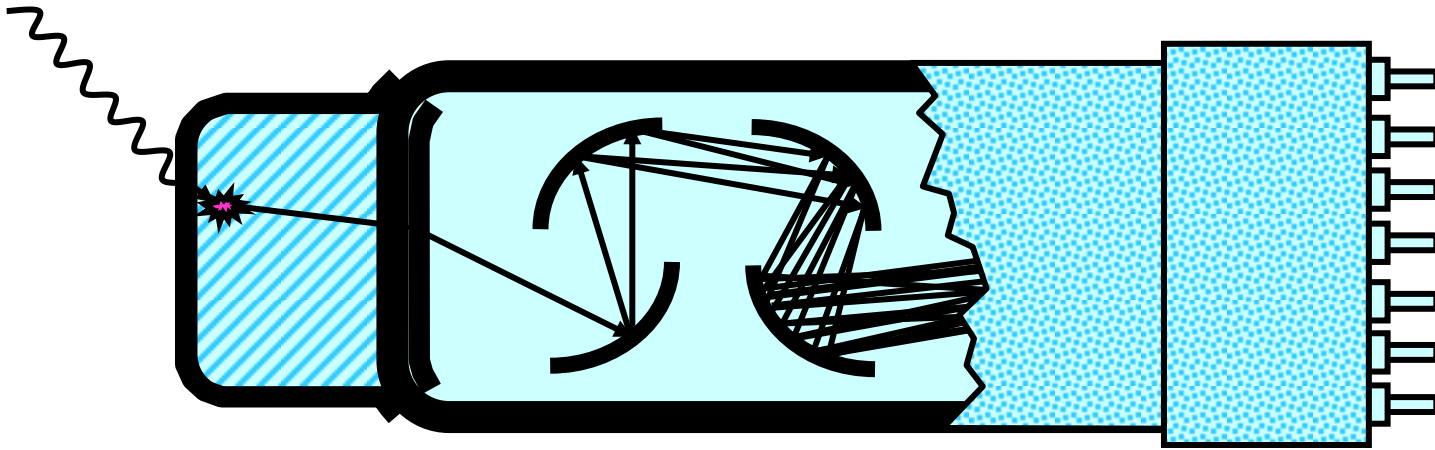


IV. Σπινθηριστές

IV.1 Γενικά (1)

Είναι ο πιο διαδεδομένος και η πλέον ευρείας χρήσης ανιχνευτής στην Πυρηνική και Φυσική των Στοιχειωδών Σωματιδίων καθώς και στις εφαρμογές:

- Ιατρική: Διαγνωστική, Computer Tomography (PET).
- Βιομηχανία: Προσδιορισμό επιπέδων, Πυρηνική τεχνολογία - πυρηνικά απόβλ.
- Περιβαλλοντολογία: Μετρήσεις, Γεωλογικές εφαρμογές.
- Φυσική: Πυρηνική, Υψηλές Ενέργειες, Στοιχειώδη σωματίδια.



IV.1 Γενικά (2)

Η λειτουργία των σπινθηριστών στηρίζεται στην ιδιότητα ορισμένων υλικών φωτεινότητας (luminescence) όταν εκτεθούν σε κάποια μορφή ενέργειας (φως, θερμότητα, ραδιενέργεια) να απορροφηθούν και να απανεκπέμπουν την ενέργεια υπό μορφών ορατών φωτονίων.

- Αν επανεκπομπή ενέργειας άμεσα (10^{-8} s) \rightarrow φθορισμός (fluorescence)
- Αν καθυστέρηση επανεκπομπής \rightarrow φωσφορισμός (phosphorescence)

Η χρονική εξέλιξη της διαδικασίας επανεκπομπής περιγράφεται από:

$$N = \frac{N_0}{\tau_d} e^{-t/\tau_d}$$

N = αριθμός φωτονίων που εκπέμπονται σε χρόνο t

N_0 = ολικός αριθμός εκπεμπομένων φωτονίων

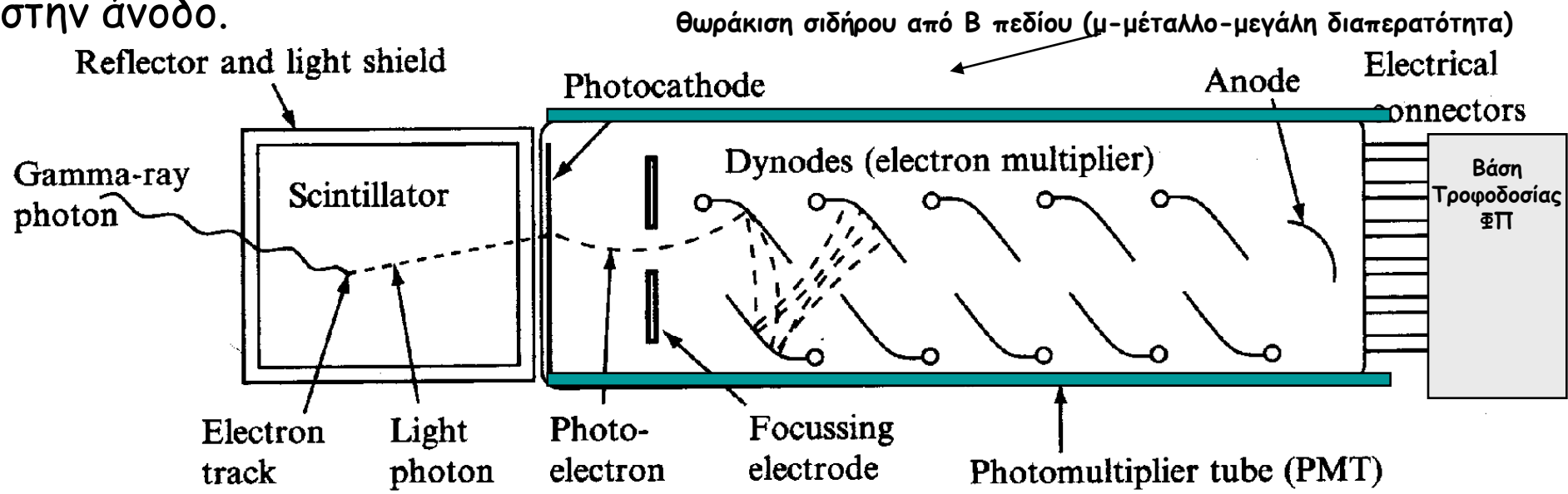
τ_d = σταθερά αυτοδιέγερσης, αντιστοιχεί στο χρόνο που απαιτείται για την εκπομπή $1 - e^{-1} = 63\%$ φωτονίων.

Τυπική Διάταξη (1)

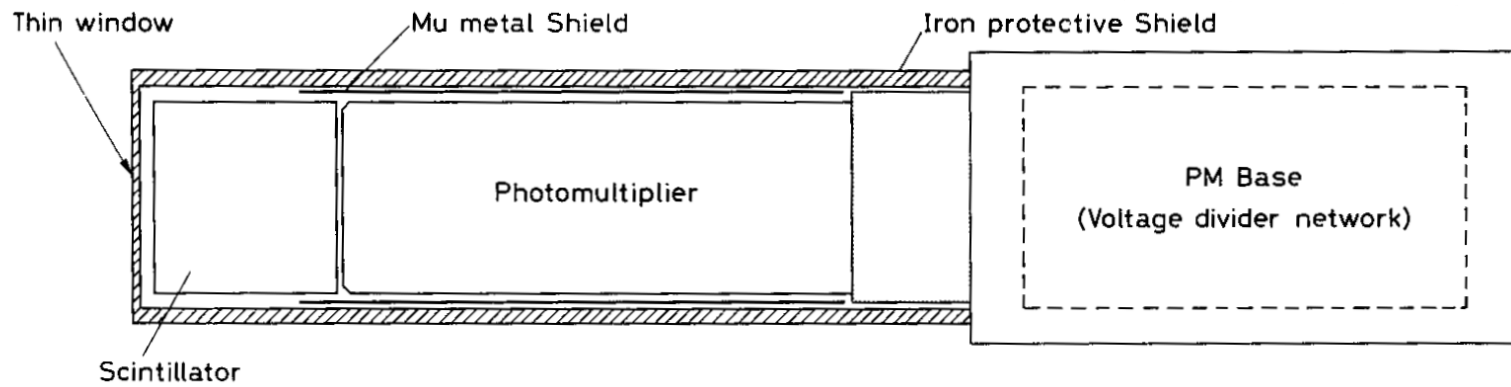
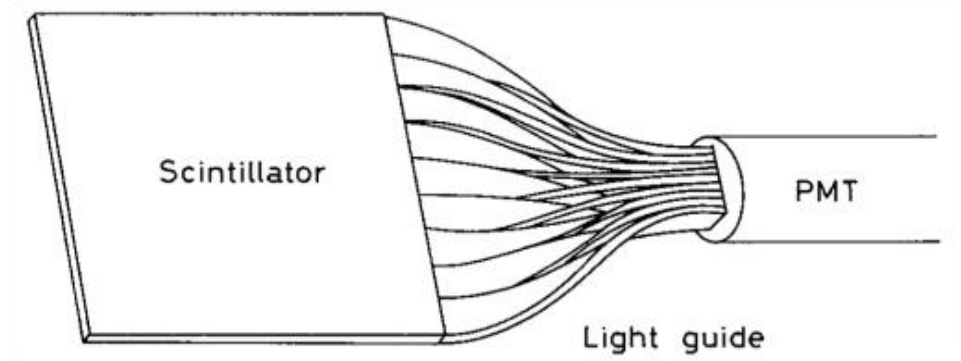
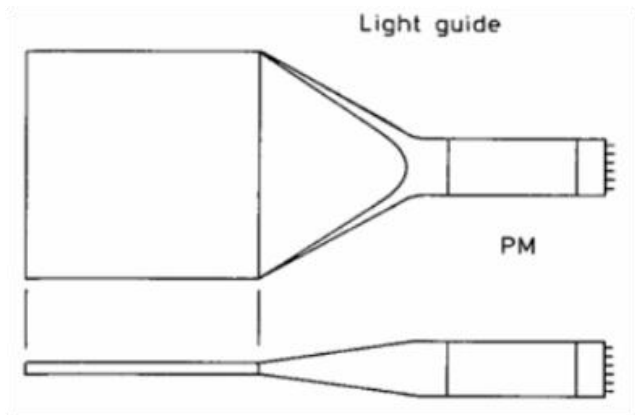
Τα βασικά στοιχεία ενός ανιχνευτή σπινθηρισμών φαίνονται στο σχήμα:

1. Σπινθηριστής
2. Φωτοπολλαπλασιαστής (ΦΠ-PMT)
3. Βάση ηλεκτρικής τροφοδοσίας του ΦΠ
4. Θωράκιση του ΦΠ

- Ακτινοβολία (εδώ, ακτίνες- γ) εναποθέτουν ενέργεια στο σπινθηριστή, προκαλούν μια περιοχή διέγερσης.
- Η αποδιέγερση δημιουργεί φωτόνια, τα οποία αφού κτυπούν τη φωτο-κάθοδο του ΦΠ δημιουργούν φωτο-ηλεκτρόνια.
- Τα φωτο-ηλεκτρόνια πολλαπλασιάζονται και δημιουργούν ένα παλμό ρεύματος στην άνοδο.



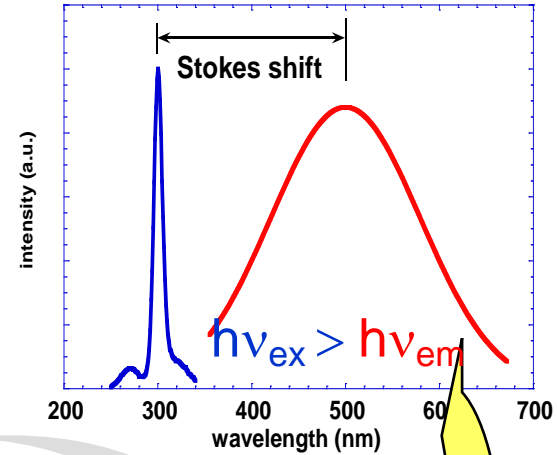
Τυπική Διάταξη (2)



Σπινθηρισμός: διαδικασία τριών βημάτων

Σπινθηριστής + ΦΤ+ΒΤ = ανιχνευτής

Πως δουλεύει;

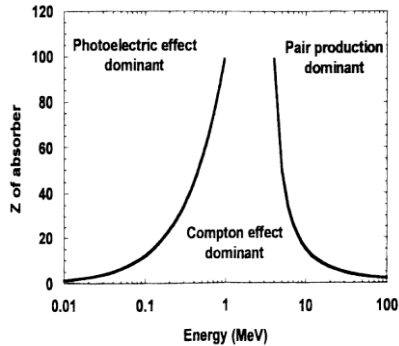


απώλεια ενέργειας e.g. γ

μετατροπή ενέργειας

εκπομπή

$$I(E) = I_0(E)e^{-\mu x}$$



Energy \rightarrow Excitation
Conduction band

band gap
 E_{bg}

Valence band

Conduction band

excitation

rad. emission
 γ

Valence band

Τύποι σπινθηριστών

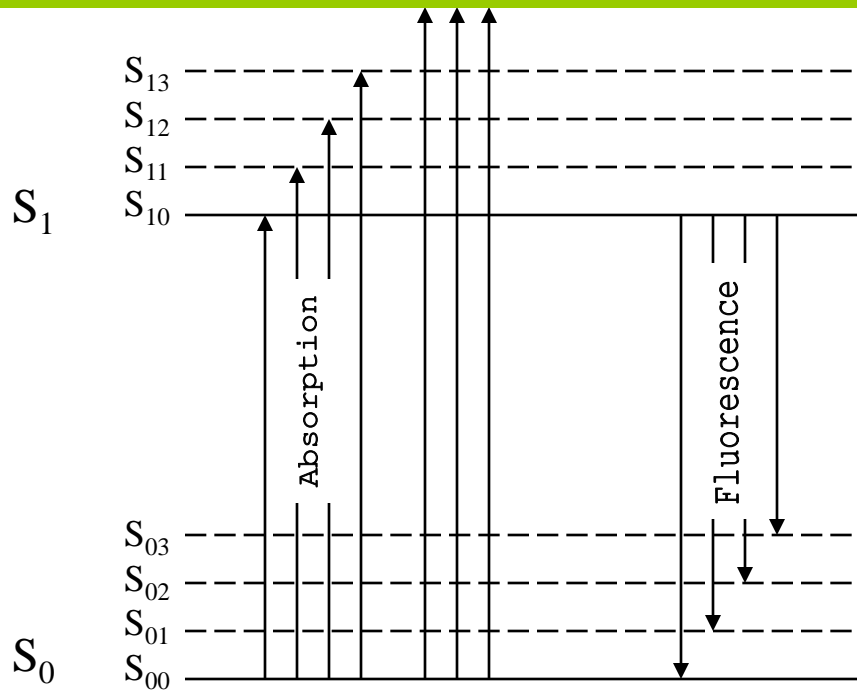
Τα κατάλληλα υλικά σπινθηρισμού καλύπτουν τις παρακάτω απαιτήσεις:

- Υψηλή απόδοση μετατροπής της διεγείρουσας ενέργειας σε ακτινοβολία φθορισμού.
- Διαφάνεια στο ορατό φως.
- Εκπομπή του ορατού φωτός σε φασματική περιοχή που αντιστοιχεί στην περιοχή φασματικής απόκρισης του ΦΤ.
- Μικρή σταθερά αποδιέγερσης.

Χρησιμοποιούνται 6 τύποι υλικά:

1. Οργανικοί κρύσταλλοι
2. Οργανικά υγρά
3. Πλαστικά υλικά
4. Ανόργανοι κρύσταλλοι
5. Αέρια
6. Γυαλιά

IV.2 Οργανικοί Σπινθηριστές (0)



S_0 and S_1 : electronic excitation states.
(ηλεκτρονικές διεγερμένες καταστάσεις)
Dashed lines: Molecular vibrational states
(μοριακές καταστάσεις ταλάντωσης)

Electronic excitation, $\sim eV$ > vibrational energies $\sim 0.1eV$

- Any of the states could be excited by energy deposited in the medium
 - Molecular excitation is lost quickly (few ps)
 - Fluorescent photons, then, are emitted in transitions from the base electronic state (S_1)
- \Rightarrow only one of these can re-excite the material

So scintillator is transparent to its own radiation

IV.2 Οργανικοί Σπινθηριστές (1)

Οι οργανικοί σπινθηριστές είναι αρωματικές ενώσεις υδατανθράκων που περιέχουν συνδεδεμένες δομές βενζοϊκών δακτυλίων.

Βραχύτατος χρόνος αποδιέγερσης \sim Χ.ns

Το φως σπινθηρισμού στις ενώσεις αυτές προέρχεται από εκπομπές των ελευθέρων ηλεκτρονίων σθένους των μορίων.

Χρησιμοποιούνται σε ποικίλης γεωμετρίας σχήματα και μορφές χωρίς να χάσουν τις ιδιότητες του σπινθηρισμού.

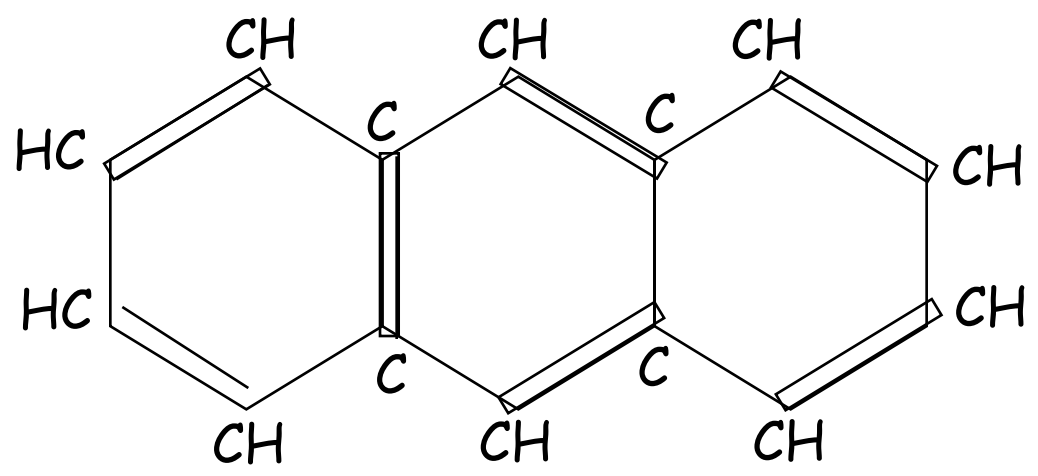
Ως ανιχνευτές χρησιμοποιούνται με τη μορφή:

- Καθαρών κρυστάλλων.
- Μιγμάτων μιας ή περισσότερων ενώσεων σε διαλύματα υγρά ή στερεά.

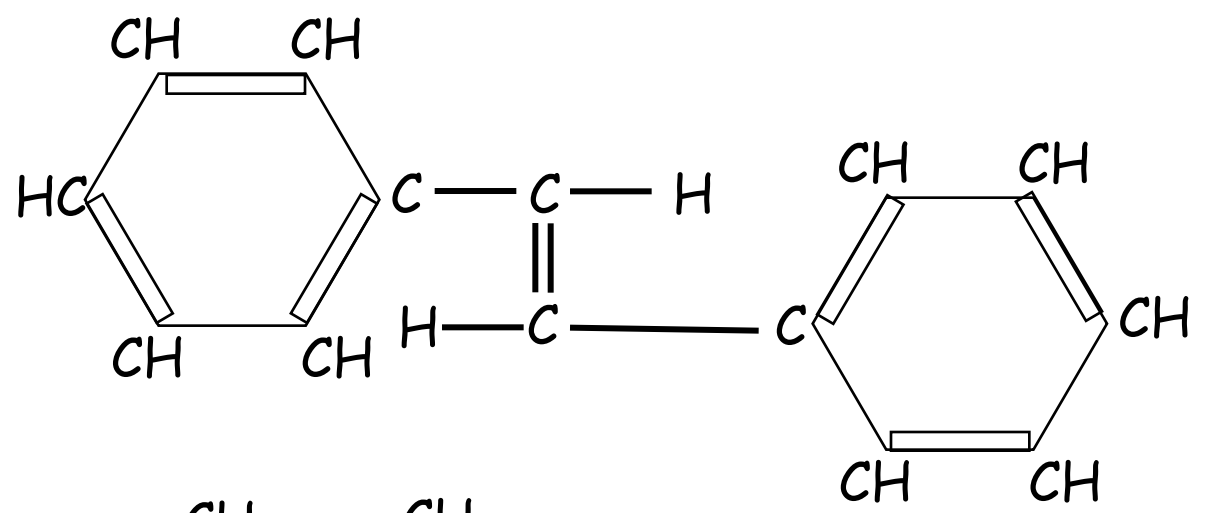
IV.2 Οργανικοί Σπινθηριστές (2)

Οργανικοί Κρύσταλλοι:

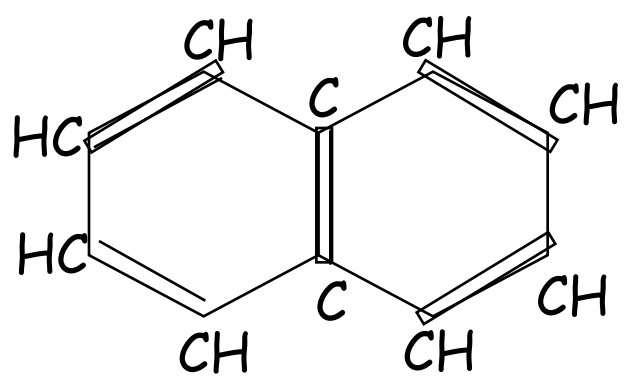
Ανθρακένιο $C_{14}H_{10}$



Ισο-Στιλβένιο $C_{14}H_{12}$



Ναφθαλίνιο $C_{10}H_8$



IV.2 Οργανικοί Σπινθηριστές (3)

Χρόνος αποδιέγερσης: 5-10 ns
30 ns (μόνο ανθρακένιο)

Παλμός απόκρισης: Ανισότροπος σύμφωνα με προσανατολισμό κρυστάλλου
(φαινόμενο Διαυλισμού-Channeling)

Φυσικές Ιδιότητες:
Κρυστάλλου σκληρός, ανθεκτικός
κοπή δύσκολη

Ανθρακένιο: έχει την υψηλότερη απόδοση φωτός από ΟΛΟΥΣ τους οργανικούς σπινθηριστές. Έχει επιλεγεί ως αναφορά, οι υπόλοιποι σπινθηριστές έχουν απόδοση φωτός σε ποσοστά επί του φωτός ανθρακενίου.

IV.2 Οργανικοί Σπινθηριστές (4)

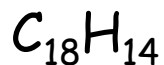
Οργανικά Υγρά:

Υγρά διαλύματα με έναν ή περισσότερους οργανικούς σπινθηριστές μέσα σε οργανικούς διαλύτες.

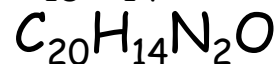
Διαδικασία Σπινθηρισμού: η ενέργεια ιοντισμού απορροφάται από το διαλύτη (κυρίως) και εν συνέχεια μεταβιβάζεται στο διαλυμένο σπινθηριστή.

Σπινθηριστές:

p-Τετρα-φαινύλιο:

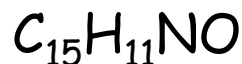


PBD:



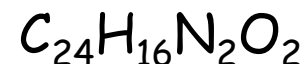
[2-φαινυλο, 5-(4-διφαινυλο)-1,3,4-Οξαδιόλη]

PPO:



[2,5-διφαινυλοξαζόλη]

POPOP:



[1,4-δισ(2-(5-φαινυλοξαζόλη)-βενζένιο)]

IV.2 Οργανικοί Σπινθηριστές (5)

Οργανικοί Διαλύτες:

Βενζόλιο:	C_6H_6
Τολουόλιο:	$CH_3 C_6H_5$
Ξυλόλιο:	$(CH_3)_2 C_6H_4$
Φαινυλο-κυκλοεξάνιο	
3-αιθυλο-βενζόλιο	
Δεκαλίνη:	$C_{10}H_{18}$

Απόδοση Υγρών Σπινθηριστών: αυξάνει με την αύξηση της συγκέντρωσης του διαλυμένου σπινθηριστή. Συνήθως: 3 g σπινθηριστή/1 lt διαλύτη

Χρόνος Αποδιέγερσης: 3-4 ns

Συμπλήρωση με άλλα υλικά:

^{11}B αυξάνει την απόδοση ανίχνευσης νετρονίων.

WaveLength Shifters: υλικά που απορροφούν το φως σε μια συχνότητα και το επανεκπέμπουν σε άλλη συχνότητα που συνήθως ταιριάζει με τη συχνότητα απορρόφησης της φωτοκαθόδου του ΦΤ. (Quenching Effect-Q.E.).

Το Q.E. αναιρείται όταν προστεθούν υλικά όπως ναφθαλίνιο, δι-φαινύλιο, κλπ.

Είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι σε προσμίξεις πάσης μορφής, αλλοιώνοντας το αποδιδόμενο ύψος παλμού. Η απόδοση τους βελτιώνεται όταν από-δρογονοποιηθούν με διοχέτευση αερίου αζώτου.

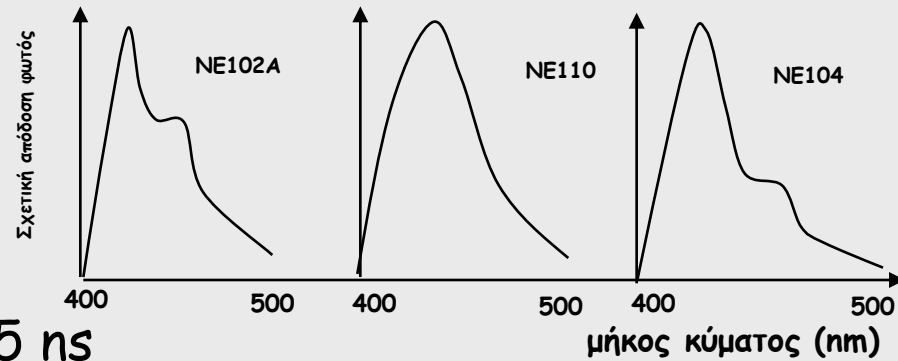
Πλαστικοί

Οι σπινθηριστές με την πλέον ευρύτατη χρήση στην Πυρηνική Φυσική:

Πολύ-βινυλο-τολουόλιο

Πολύ-φαινυλο-βενζόλιο

Πολύ-Στυρένιο



Ιδιαίτερα ταχείς χρόνοι αποδιέγερσης: 2-5 ns

Υψηλή απόδοση φωτός εξόδου με κατανομή:

$$N(t) = N_o f(\sigma, t) e^{-t/\tau_d}, \quad \text{σχέση Bengston-Moszynski}$$

$f(\sigma, t)$ = gaussian με τυπική απόκλιση:

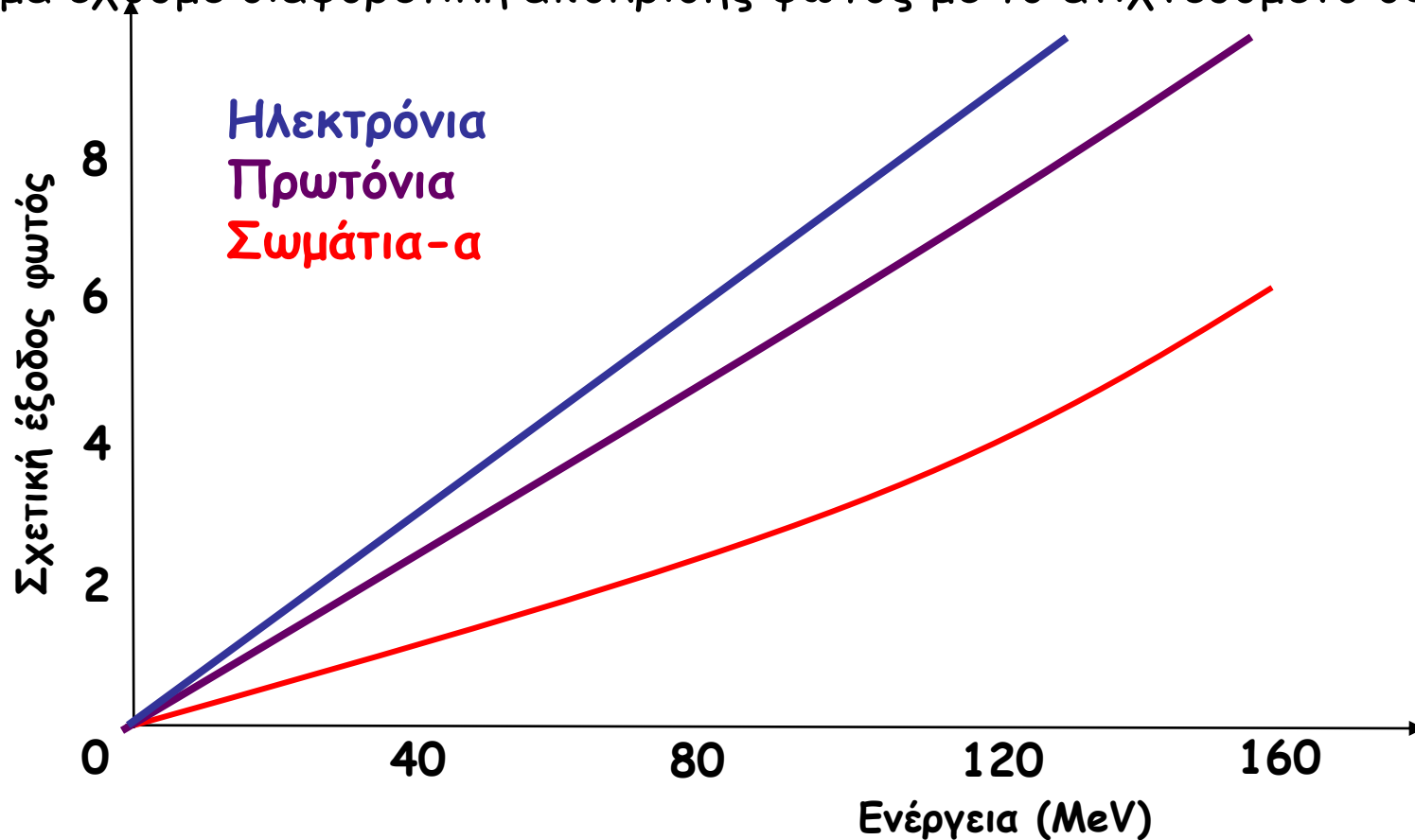
<u>Σπινθηριστής</u>	<u>σ (ns)</u>	<u>τ (ns)</u>
NE102A	0.7	2.4
NE111	0.2	1.7

Ιδιαίτερα ΕΥΧΡΗΣΤΟΙ, σε ποικίλα σχήματα και μορφές, παράγονται σε φύλλα (λεπτά υμένια), μέχρι τεράστια φύλλα, μεγάλα κομμάτια, κυλινδρικούς, κλπ.

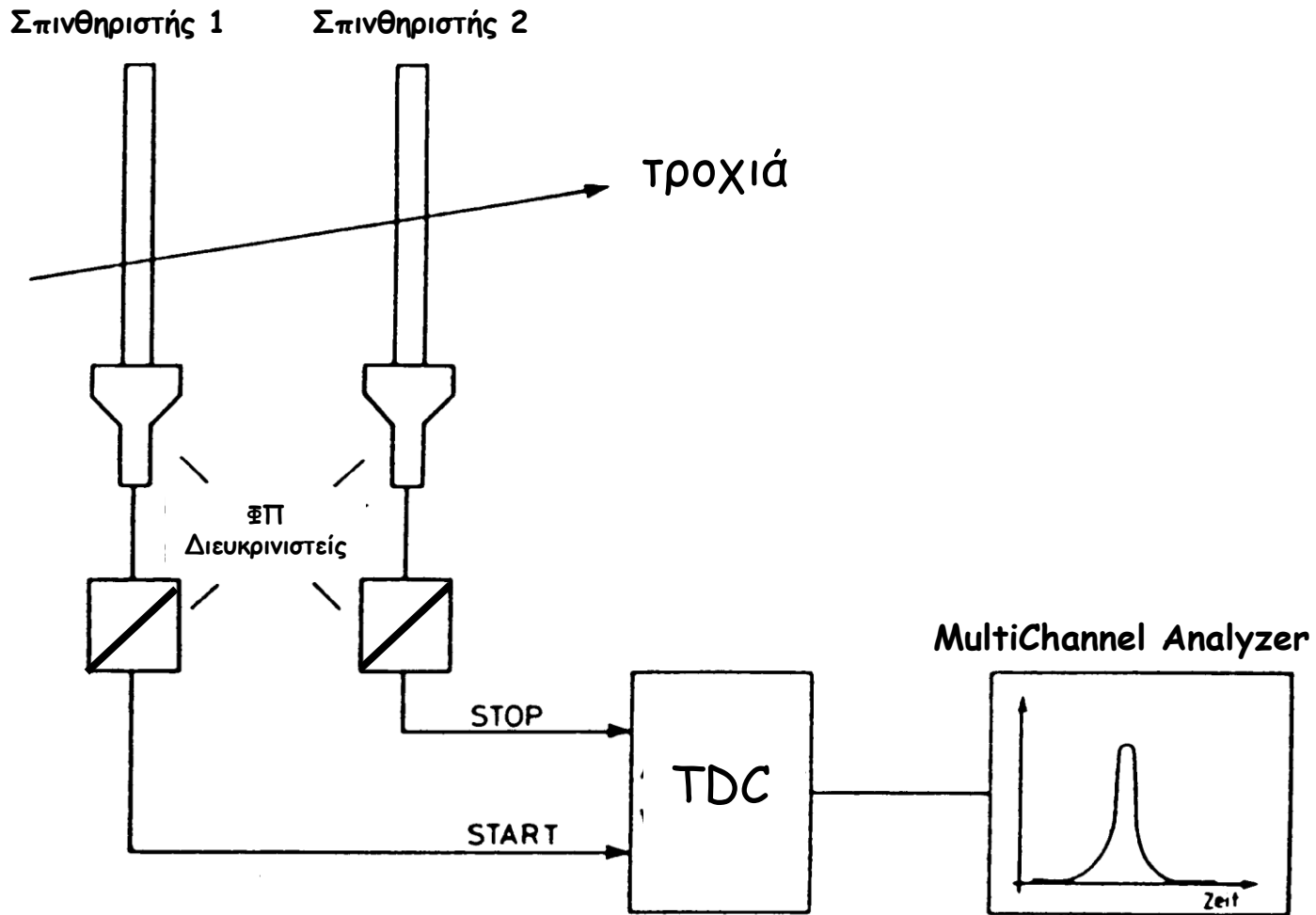
Ιδιαίτερα ΕΥΑΙΣΘΗΤΟΙ σε οργανικούς διαλύτες, οξέα, ιδρώτας, κλπ.

Οι πλαστικοί σπινθηριστές χρησιμοποιούνται σε σύνθετες ανιχνευτικές μονάδες σε συνδυασμό με θαλάμους ιονισμού, με θαλάμους ιονισμού, με σύστημα μέτρησης χρόνου πτήσης (Time of Flight - TOF).

Στο σχήμα έχουμε διαφορετική απόκριση φωτός με το ανιχνευόμενο σωματίδιο.



Σύστημα μέτρησης TOF



TDC: Time to Digital Converter

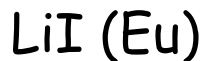
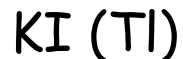
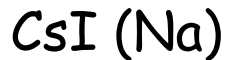
IV.2 Ανόργανοι Σπινθηριστές (1)

Ανόργανοι Κρύσταλλοι:

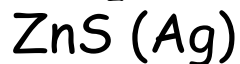
Συνήθως είναι αλκαλικές ανώσεις με αλογόνα που περιέχουν μικρή πρόσμιξη ενεργοποιητού.

Ο πλέον διαδεδομένος: NaI + πρόσμιξη Θαλίου (Tl)

Άλλοι κρύσταλλο είναι: CsI (Tl)



Μη- Αλκαλικοί κρύσταλλοι: $\text{Bi}_4 \text{Ge}_3 \text{O}_{12}$ (BGO)



IV.2 Ανόργανοι Σπινθηριστές (2)

Χρόνος απόκρισης: Αργός ~ 500 ns

Βασικό μειονέκτημα: Υγροσκοπικότητα πλην του CsI (TI)

Φυσικές Ιδιότητες: Υψηλή πυκνότητα \rightarrow Ακτίνες- γ , ενεργά ηλεκτρόνια
(κατάλληλοι για ανίχνευση)

BGO: αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω υψηλού Z και μεγαλύτερης απόδοσης για φωτοηλεκτρική μετατροπή των ακτίνων- γ .
(3 με 5 φορές μεγαλύτερη απόδοση από NaI).

BaF₂: έχει μια ταχύτατη συνιστώσα φωτός στο υπεριώδες (UV)
χρόνο αποδιέγερσης ~ 500 ps
έξοδος φωτός χαμηλή.

IV.2 Ανόργανοι Σπινθηριστές (3)

Αέριοι Σπινθηριστές:

Ευγενή αέρια Xe, Ne, Ar, He με άζωτο. Τα άτομα διεγείρονται και αποδιεγείρονται με εκπομπή φωτός σε 1 ns.

Φως στο UV.

Απαραίτητη η χρήση wavelength shifter (διφαινυλοστυλβενίου).

Γυάλινοι Σπινθηριστές:

Ce(Li) Πυριτίδια Βορίου. Ιδιαίτερα ανθεκτικός σε υψηλές θερμοκρασίες.

Χρόνος αποδιέγερσης ~ 10-50 ns.

Έξοδος φωτός: 25-30% του φωτός ανθρακενίου.

Ιδιότητες των πλέον διαδεδομένων Σπινθηριστών

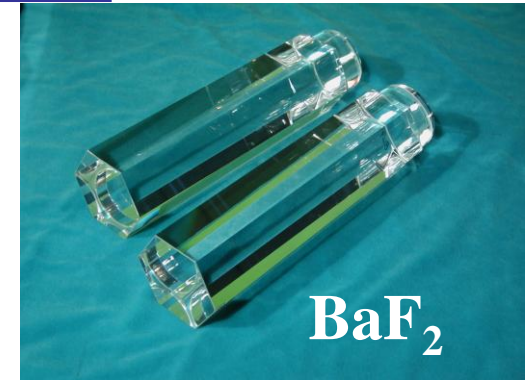
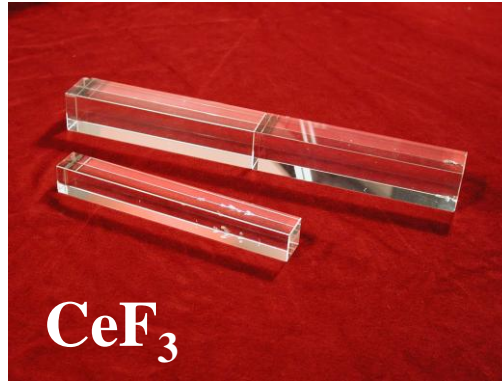
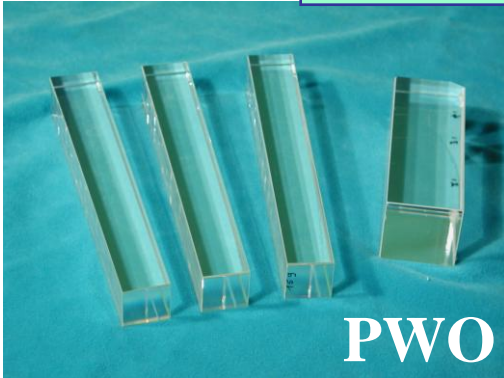
Material	Type	Density	Emission max. (nm)	Time constant (ns)	Light output ^a
NaI(Tl)	Inorganic crystal	3.67	410	250	100
CsI(Tl)	Inorganic crystal	4.71	550	1000	0.45
BGO	Inorganic crystal	7.13	480	300	0.15-0.2
Stilbene	Organic solid	1.16	384	3-8	0.2
NE102A ^b	Plastic (org. solid)	1.03	425	2.5	0.28
NE213 ^b	Organic liquid	0.87	425	3.7	0.34

^a Relative to NaI(Tl)

^b Nuclear Enterprises Ltd.

Κρύσταλλοι

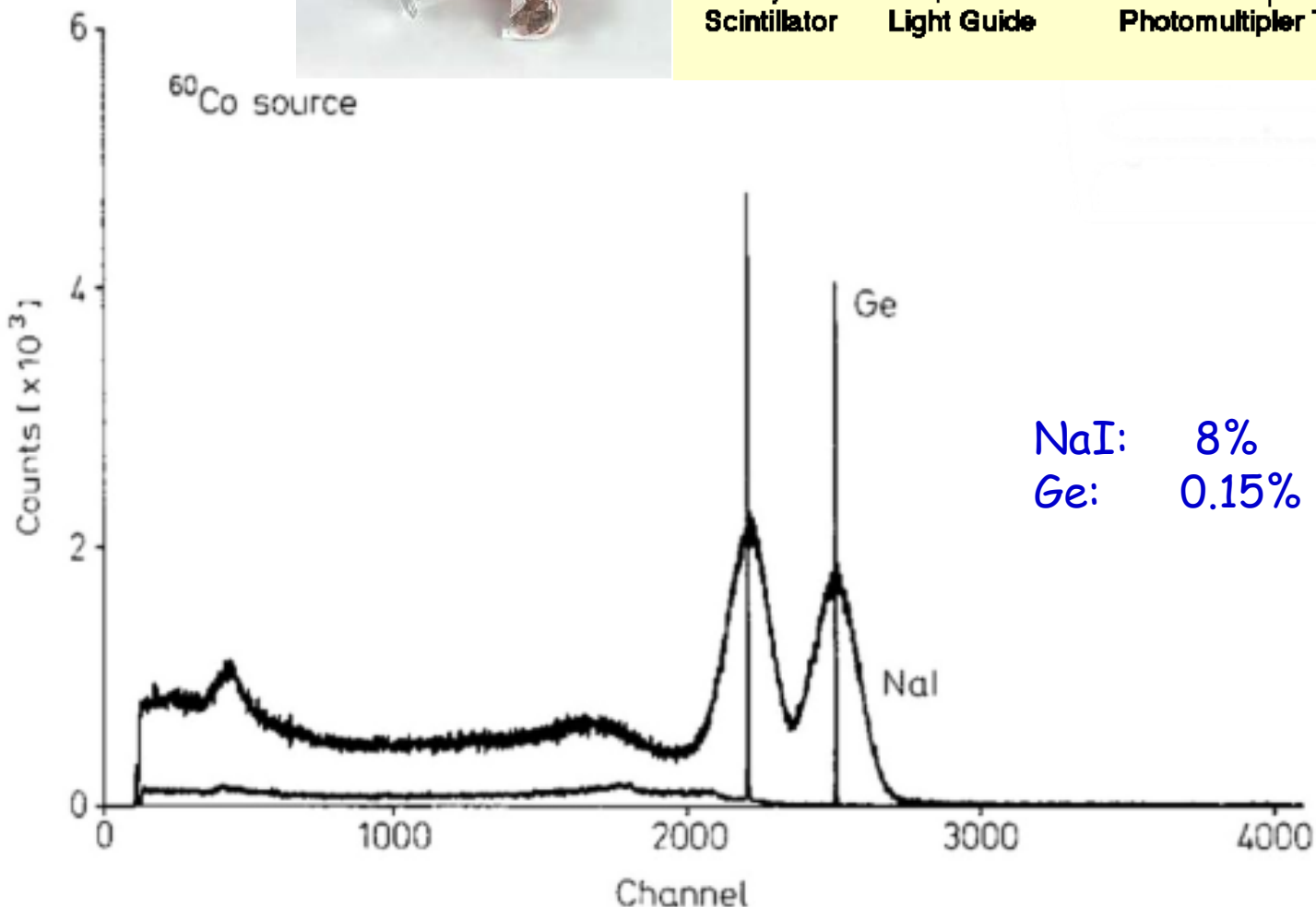
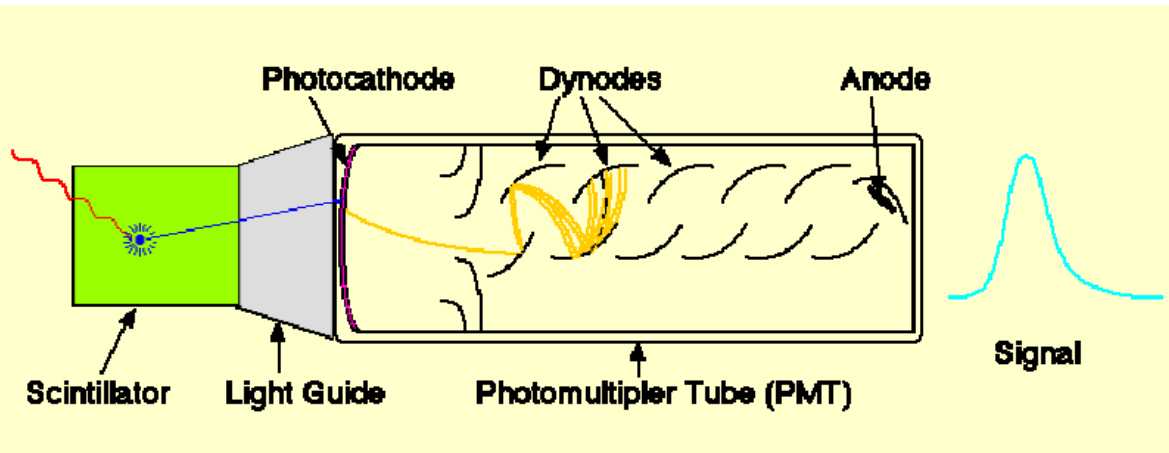
Αυτοί οι κρύσταλλοι παράγουν φως light!



Κρύσταλλοι είναι τα υλικά για ηλεκτρομαγνητικά καλορίμετρα για να έχουμε ακρίβεια στις μετρήσεις



Ενεργειακή Διακριτική Ικανότητα NaI-Scintillator - Germanium



NaI: 8% (25 eV per photon)
Ge: 0.15% (3 eV per photon)

IV.3 Φωτοπολλαπλασιαστές (1)



Ο φωτοπολλαπλασιαστής (ΦΠ):

- διάταξη λυχνίας κενού,
- μετατρέπεται φωτόνια σε φωτο-ηλεκτρόνια,
- πολλαπλασιάζει διαδοχικά τα ηλεκτρόνια σε μετρήσιμο ηλεκτρικό ρεύμα.

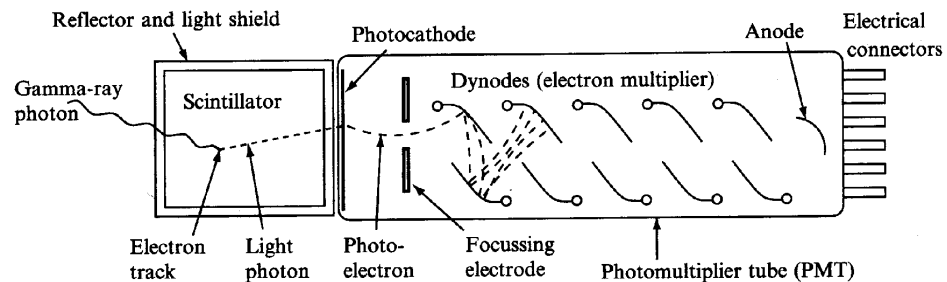
Αποτελείται από:

• Φωτοκάθοδο: γυάλινη, με μεταλλική επίστρωση, ημιδιαφανή, σχήμα ημικυλινδρικό. Εσωτερική επιφάνεια με φωτοευαίσθητη ουσία.

• Ηλεκτρονικό-Οπτικό Σύστημα: Βοηθητικό ηλεκτρόδιο για εστίαση φωτοηλεκτρ. στην 1^η δύνοδο, κατάλληλη ηλεκτρο-οπτική γεωμετρία καθόδου-ανόδου.

• Πολλαπλασιαστικό Σύστημα: δύνοδοι με δευτερογενή εκπομπή ηλεκτρονίων, διαδοχικός πολ/σμός ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου.

• Άνοδος: ηλεκτρόδιο συλλογής όλων των ηλεκτρονίων - παρέχει στην έξοδο παλμικό ρεύμα.



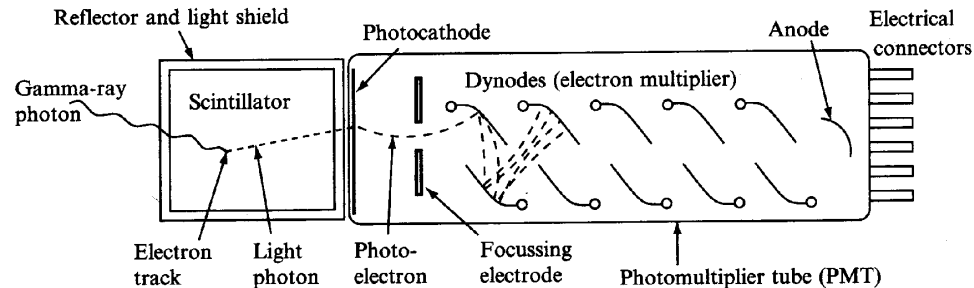
IV.3 Φωτοπολλαπλασιαστές (2)

Φωτοκάθοδος μετατρέπει το εισερχόμενο φως σε ρεύμα φωτοηλεκτρονίων λόγω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου:

$$E = h\nu - \phi$$

E = κινητική ενέργεια ηλεκτρονίου
 ϕ = έργο εξόδου

Για συχνότητα φωτός $\nu > \phi/h$ ισχύει ότι έχουμε εκπομπή φωτοηλεκτρονίων!



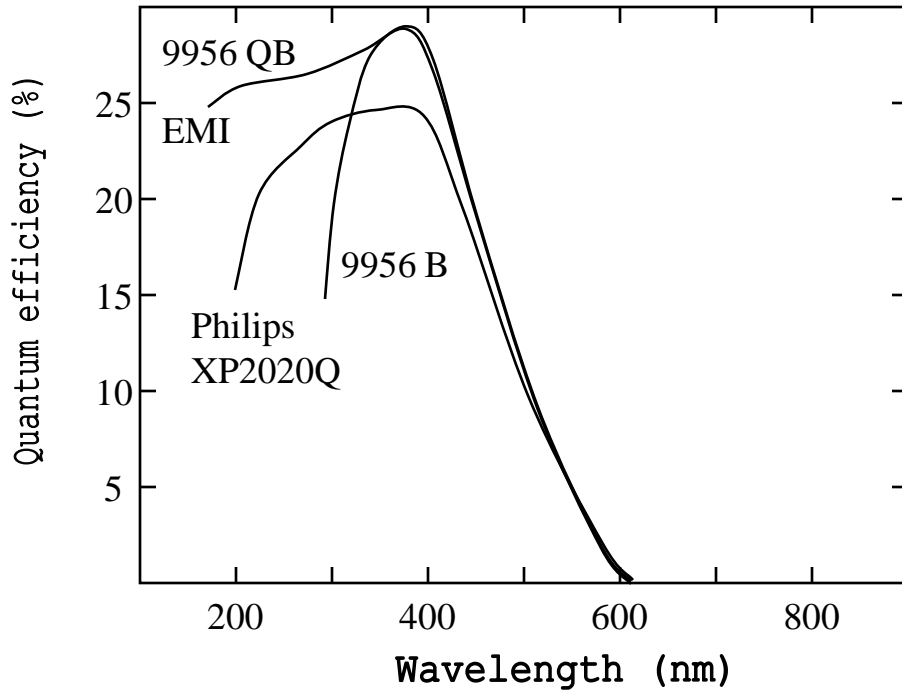
Κατασκευή
Γεωμετρία
Ποιότητα
Συνθήκες λειτουργίας

Συνθέτουν την ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ (quantum efficiency) σε μήκος κύματος λ , που είναι ο αριθμός των φωτοηλεκτρονίων που εκπέμπονται από την φωτοκάθοδο με την πρόσπτωση ενός γ :

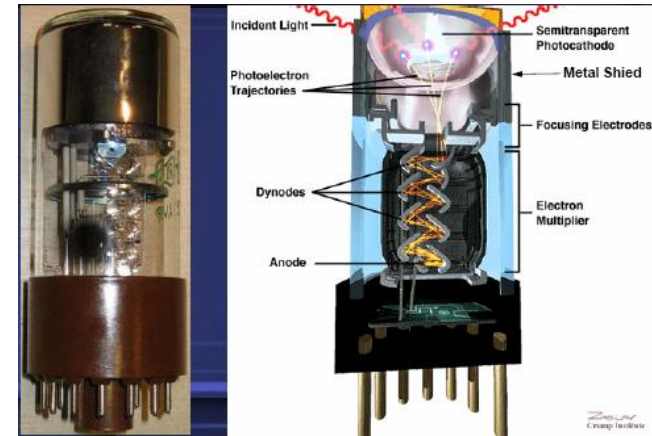
$$\eta(\lambda) = \frac{\text{αριθμός φωτοηλεκτρονίων}}{\text{αριθμός φωτονίων στην κάθοδο}} \%$$

IV.3 Φωτοπολλαπλασιαστές (3)

Εκπομπή φωτοηλεκτρονίων από τη φωτοκάθοδο



Έχουμε περίπου 25% απόδοση (efficient) σε βέλτιστο μήκος κύματος



Ισχύει: $\eta(\lambda) = \frac{\epsilon'_\lambda}{\lambda} \times 12395$, ϵ'_λ = ευαισθησία φωτοκαθόδου

σε ακτινοβολία E_λ :

$$E_\lambda [A/W] = \frac{I_k}{P(\lambda)} \quad I_k = \text{ρεύμα φωτοκαθόδου}, P(\lambda) = \text{εισερχόμενη ισχύς ακτ/λίας}$$

$$E(\lambda) = \lambda \eta(\lambda) \frac{e}{hc} = \frac{\lambda \eta(\lambda)}{1240} [A/W]$$

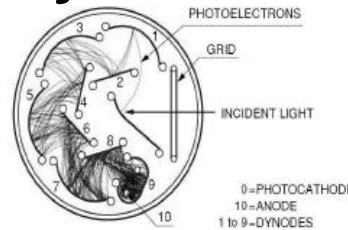
IV.3 Φωτοπολλαπλασιαστές (4)

Ηλεκτρο-οπτικό σύστημα εισόδου: σημαντική διάταξη για τη λειτουργία του ΦΠ. Απαιτούνται:

- Η καλύτερη δυνατή συλλογή φωτο-ηλεκτρονίων ανεξάρτητα από το σημείο παραγωγής τους.
- Χρόνος πτήσης ηλεκτρονίων από φωτο-κάθοδο μέχρι 1^η δύνοδο ανεξάρτητος του σημείου παραγωγής.

Σύστημα πολλαπλασιασμού: Παράγων δευτερογενούς ενίσχυσης: δ
 Ενίσχυση του ΦΠ για n δυνόδους:

$$G = \delta^n$$



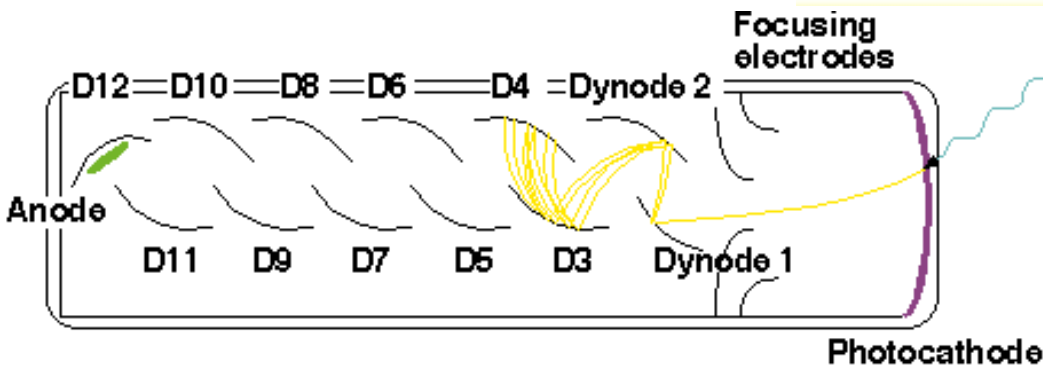
$$G = f (g\delta)^n$$

f = ικανότητα συλλογής ηλεκτρ. από δυνόδους

g = συντελ. μεταφοράς ηλεκτρ. δύνοδο-δύνοδο

Ο συντελεστής δ αυξάνεται με την αύξηση του δυναμικού V_d ανάμεσα στις δυνόδους: $\delta = k V_d$

Ολικό δυναμικό: $V_b = nV_d = \frac{n}{k} G^{1/n}$



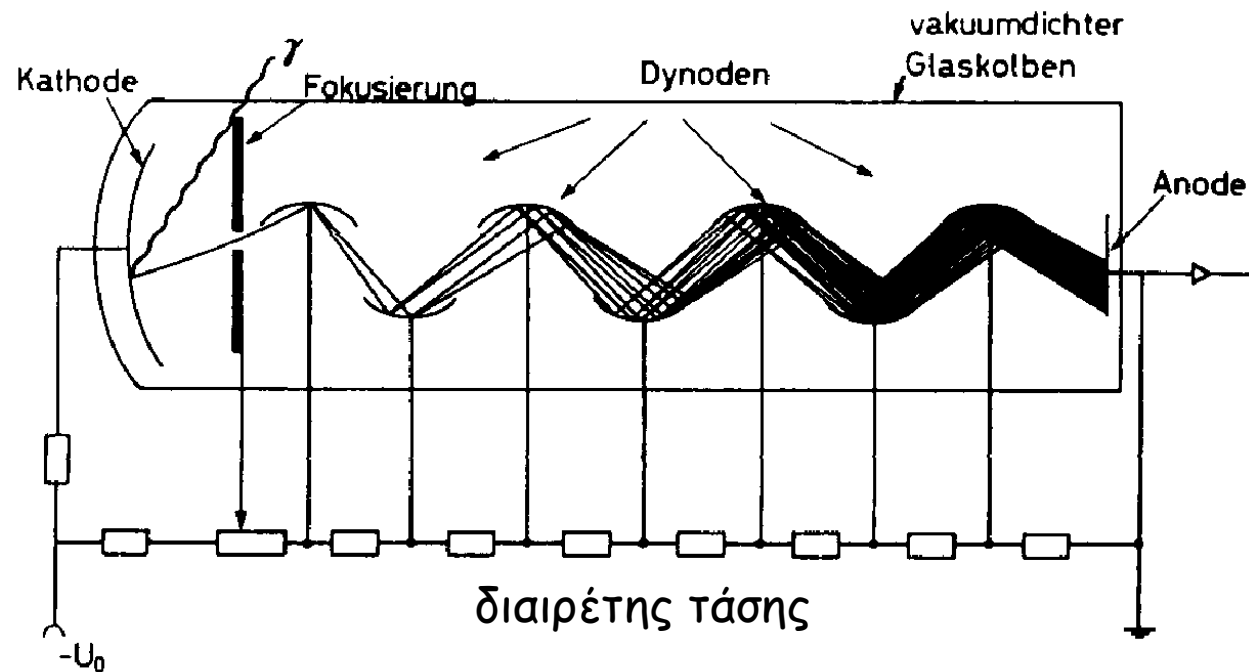
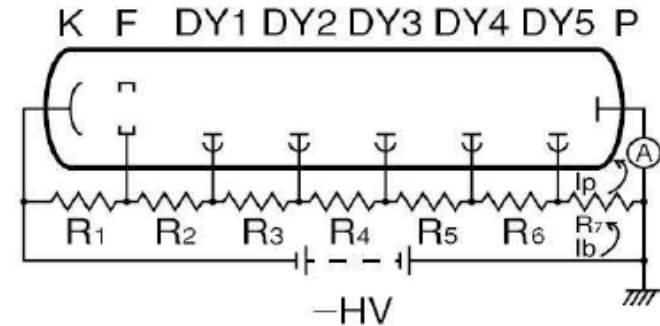
IV.3 Φωτοπολλαπλασιαστές (5)

Διαιρέτης τάσης:

Ιδιαίτερα σημαντικό μέρος της τροφοδοσίας του ΦΠ.

Απαιτήσεις:

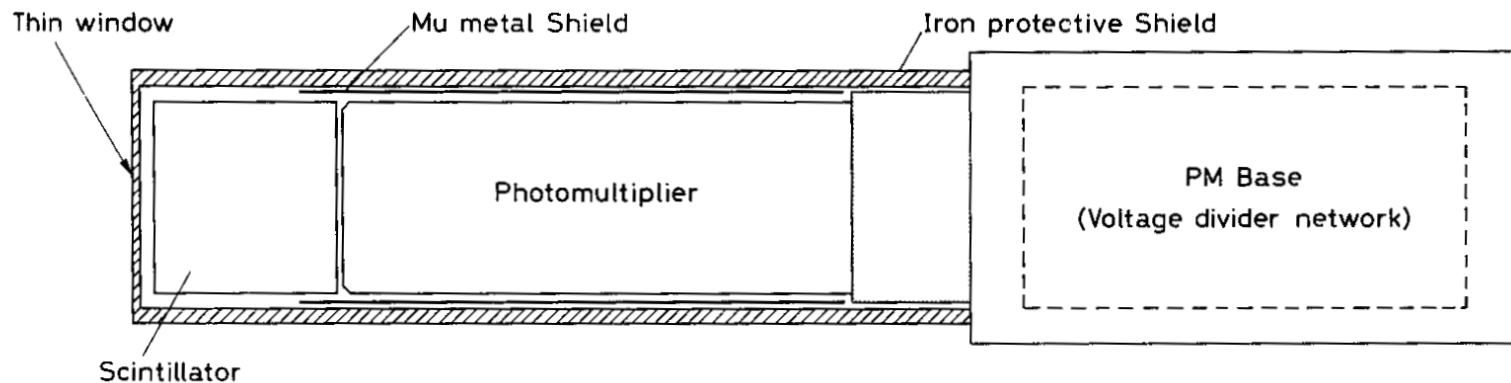
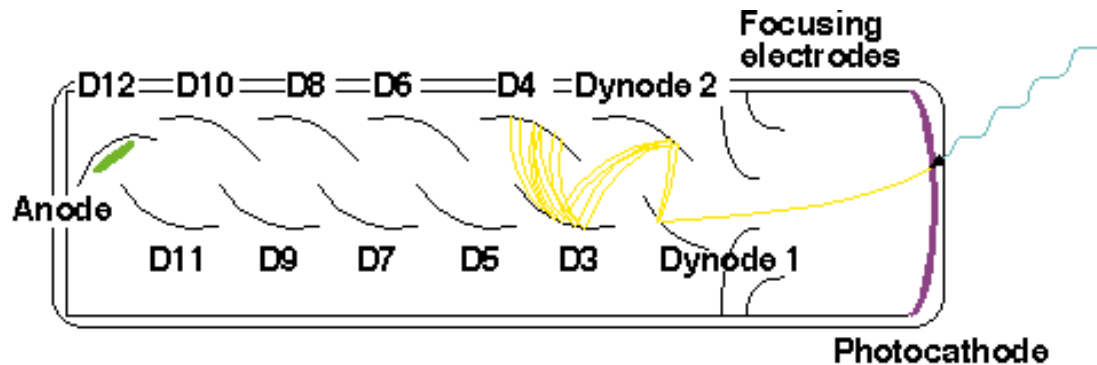
- Σταθερότητα τάσης μεταξύ δυνόδων.
- Αποφυγή ή απόσβεση διακυμάνσεων τάσης.



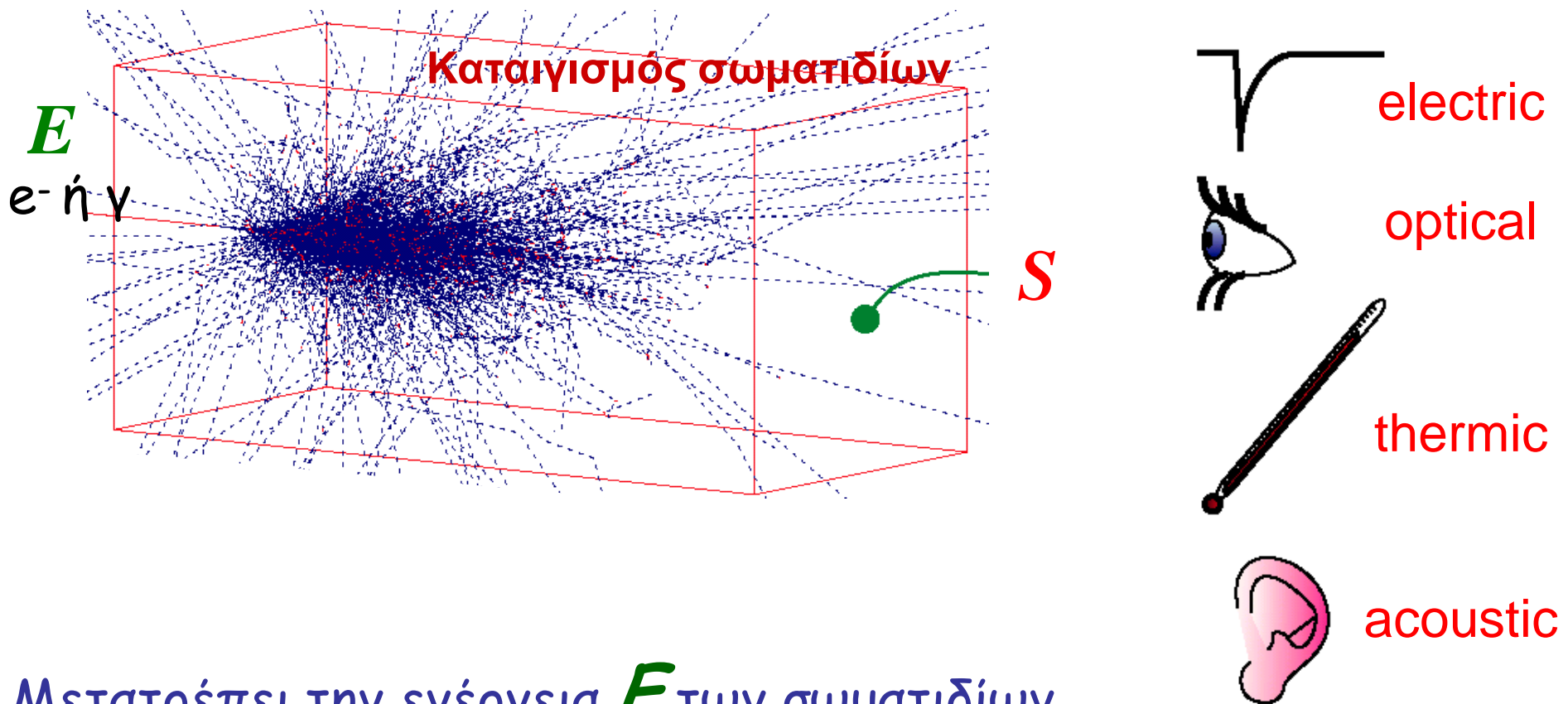
IV.3 Φωτοπολλαπλασιαστές (6)

Επίδραση Μαγνητικού πεδίου:

Εξασθενίζει τη λειτουργία του ΦΠ. Ελάχιστο μαγνητικό πεδίο αποκλίνει τα ηλεκτρόνια από την τροχιά του → μηδενίζεται το ρεύμα...



Καλορίμετρα: Αρχή λειτουργίας



Μετατρέπει την ενέργεια E των σωματιδίων
σε απόκριση ανιχνευτή S :

$$S \propto E$$

Η ενέργεια των σωματιδίων μετρείται με ένα καταστρεπτικό τρόπο. Θα πρέπει να σταματήσουμε τελείως το φορτισμένο ή γ σωματίδιο στον ανιχνευτή ώστε να μετρήσουμε όλη την ενέργεια του σωματιδίου.

Η ενέργεια εναποτίθεται σε κάποιο σημείο του χώρου, και επομένως η **θέση** μπορεί να καθοριστεί με ακρίβεια, εξαρτάται βέβαια από τις εγκάρσιες μεταβολές της ενέργειας και από τη σχεδίαση του ανιχνευτή.

Η ακρίβεια της μέτρησης της ενέργειας προέρχεται από ένα:

- σταθερό όρο: ομοιομορφία του υλικού του ανιχνευτή, και ένα
- στοχαστικό όρο: επίπεδο της ενεργούς δειγματοληψίας σχετικά με τον ολικό όγκο του ανιχνευτή.

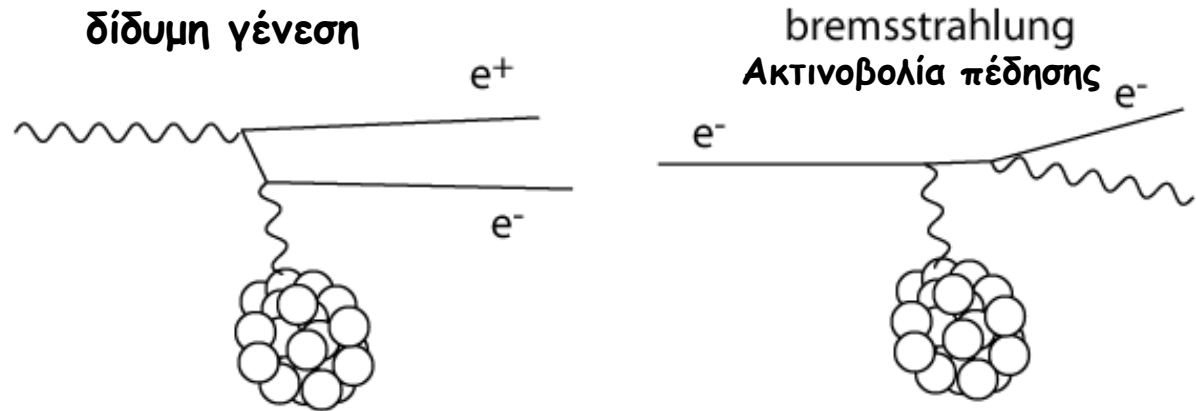
Τα καλορίμετρα μπορούν να μας παρέχουν επίσης την ορμή του σωματιδίου, ώστε να ελέγχεται σε σχέση με την ορμή που προσδιορίζεται από το σύστημα προσδιορισμού τροχιάς+μαγνήτη.

Σε $E > 10 \text{ MeV}$, οι αλληλ/σεις των γ και e^- στην ύλη κυριαρχείται κυρίως από την παραγωγή των e^+e^- and Bremsstrahlung.

Σε χαμηλές ενέργειες ο ιονισμός είναι πιο σημαντικός.

Ο λόγος της απώλειας ενέργειας για αυτές τις διαδικασίες είναι:

$$R = \frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{Brem}}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{ion}} \sim \frac{ZE}{580 \text{ MeV}}$$



Κριτική ενέργεια:

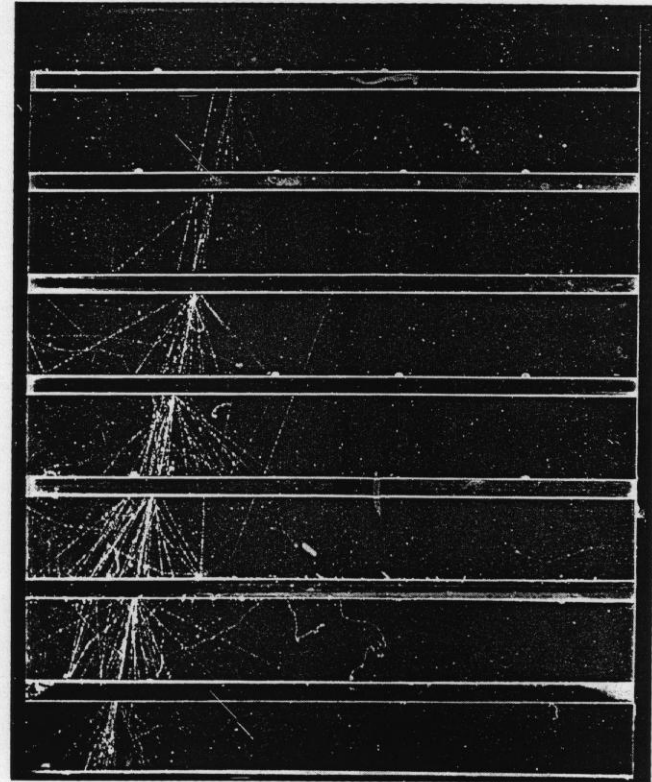
Όταν η απώλεια ενέργειας που οφείλεται σε Brem = απώλεια ενέργειας που οφείλεται σε ιοντισμό:

$$E_c = \frac{580 \text{ MeV}}{Z}$$

Ηλεκτρομαγνητικός Καταιγισμός

Μια εναλλασσόμενη ακολουθία αλλ/σεω οδηγεί σε ένα καταιγισμό (shower):

- Αρχικό γ με ενέργεια E_0 δημιουργεί e^+e^- με πιθανότητα 54% σε πάχος X_0
- Κατά μέσον όρο, καθένα έχει ενέργεια $E_0/2$
- Αν $E_0/2 > E_c$, χάνουν ενέργεια με Brem
- Στο επόμενο πάχος X_0 , η ενέργεια του φορτισμένου σωματιδίου μειώνεται στο $E_0/(2e)$
- Ακτινοβολία Brem με μέση ενέργεια από $E_0/(2e)$ ως $E_0/2$
- Μέσος # σωματιδίων μετά από $2X_0$ πάχη είναι ~ 4
- Παράγονται πάλι ζεύγη γ



Cloud chamber photo of electromagnetic cascade between spaced lead plates.

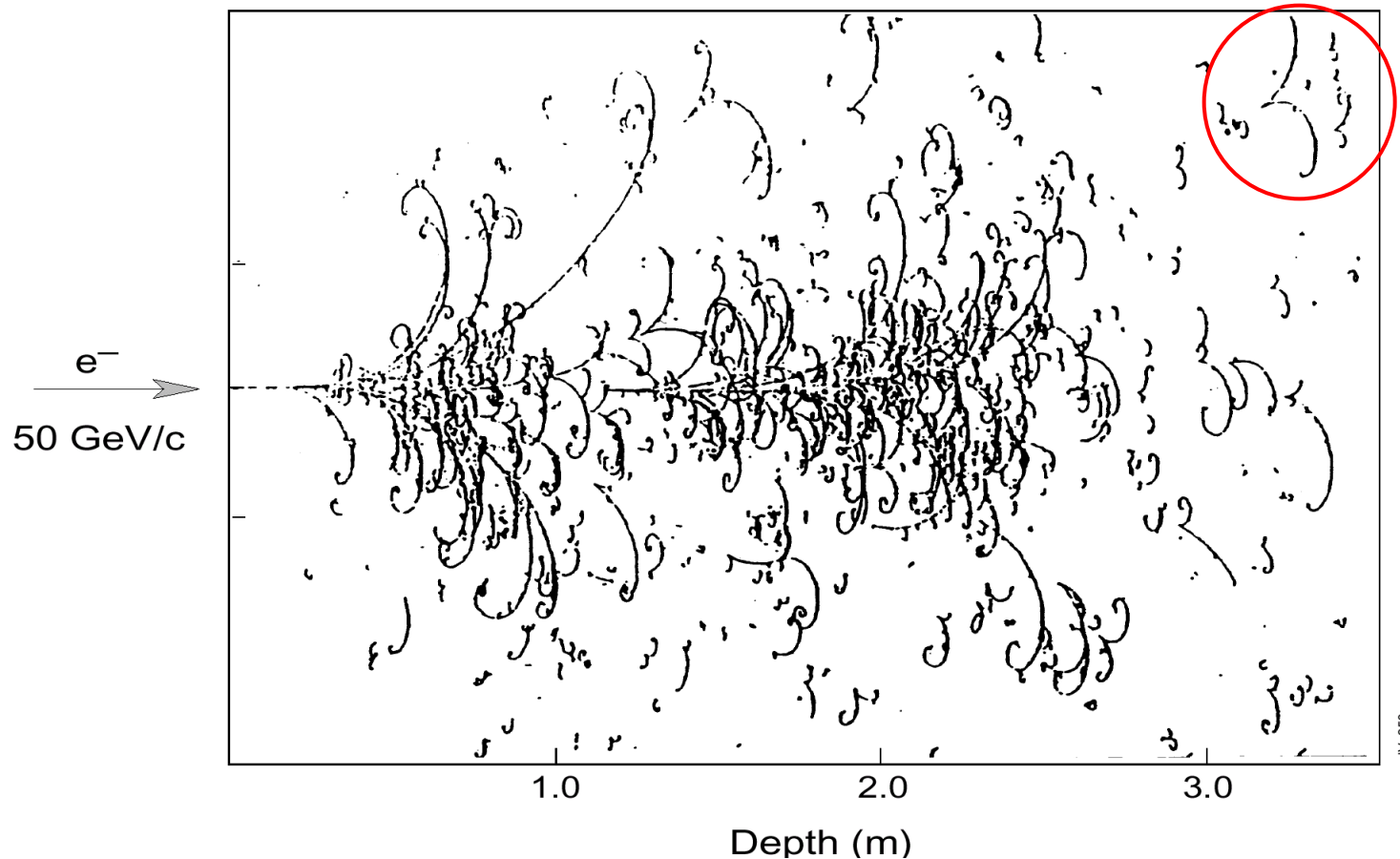
Μετά από t γενιές ($\Delta x = tX_0$), 2^t σωματίδια, μέση ενέργεια $E_0/2$ καταιγισμού.

Καταιγισμός σταματά: ενέργεια $e^- \rightarrow$ κριτική ενέργεια $E_c = E_0/2^t$.

Αριθμός γενιών: $t = \ln(E_0/E_c)/\ln 2$.

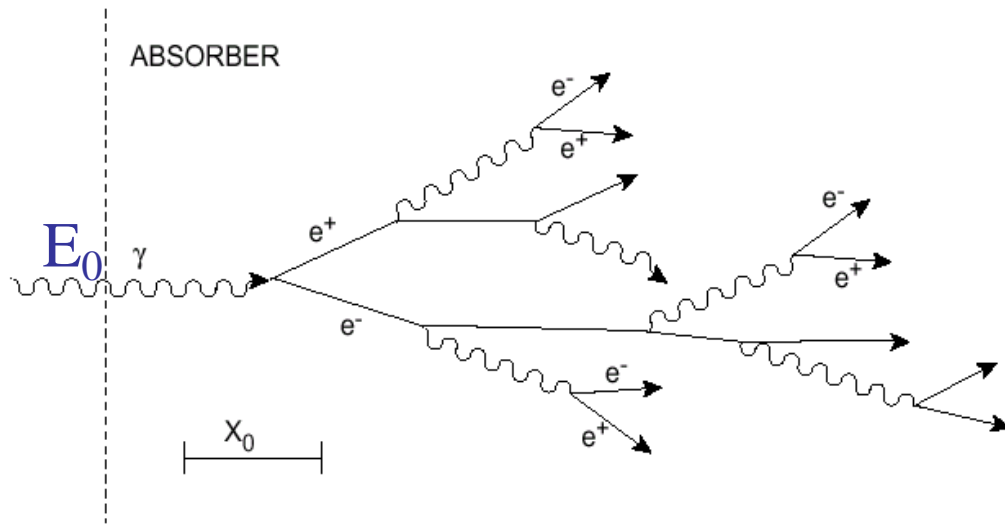
Αριθμός σωματιδίων του καταιγισμού στο σημείο max: $N_p = 2^t = E_0/E_c$.

Ηλεκτρομαγνητικός Καταιγισμός



**Big European Bubble Chamber filled with $\text{Ne}:\text{H}_2 = 70\%:30\%$,
3T Field, $L=3.5 \text{ m}$, $X_0 \approx 34 \text{ cm}$, 50 GeV incident electron**

ΗΜ καταίγισμός: ένα απλό μοντέλο



- Σε $1X_0$ ένα e χάνει $\sim 2/3$ της E ένα ενεργητικό γ έχει πιθανότητα $7/9$ για δίδυμη γέννηση.
- Έστω X_0 είναι το μήκος μιας γενιάς
- Σε κάθε γενιά ο αριθμός των σωματιδίων αυξάνει κατά 2

$$\textcircled{\Delta x = X_0} \quad \gamma \rightarrow e^+ e^- \quad E = E_0/2$$

$$\textcircled{\Delta x = 2X_0} \quad e \rightarrow \gamma e' \quad E' = E_0/4$$

$$\textcircled{\Delta x = tX_0} \quad N(t) = 2^t \quad E(t) = E_0 / 2^t$$

$$E(t_{\max}) = E_c \quad E_0 / 2^{t_{\max}} = E_c$$

$$t_{\max} = \ln(E_0/E_c) / \ln(2)$$

$$N(t_{\max}) = 2 E_0/E_c - 1$$

Ιδιότητες ΗΜ Καταιγισμού

Ιδιότητες του ΗΜ καταιγισμού:

- # σωματιδίων στο max καταιγισμού N_p ανάλογος του E_0
- Μήκος τροχιάς (βαθος) των e^- , e^+ ανάλογο του E_0
- Βάθος για maximum X_{max} αυξάνει λογαριθμικά:

Διαμήκη απόθεση ενέργειας:

$$\frac{dE}{dt} = E_0 c t^\alpha \exp(-\beta t), \text{ όπου } t = X / X_0 \text{ και}$$

$$\beta \approx 0.5, \alpha \approx \beta t_{max}, \text{ και } c = \beta^{\alpha+1} / \Gamma(\alpha + 1)$$

λογαριθμικά με ενέργεια

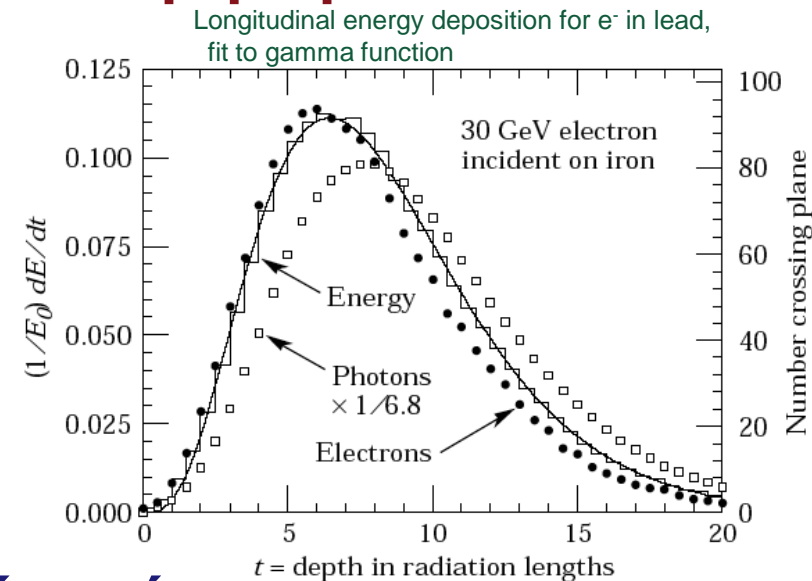
Εγκάρσια διάσταση καταιγισμού:

πολλαπλές σκεδάσεις για e^- χαμηλής ενέργειας:

Moliere Radius: $R_M = 21 \text{ MeV} * X_0 / E_c$

Ακτινική κατανομή της R_M ανεξάρτητη του τύπου του υλικού!

99% της ενέργειας βρίσκεται μέσα σε ακτίνα $3 R_M$.



Ενεργειακή Διακριτική Ικανότητα

Η ενεργειακή διακριτική ικανότητα ενός ιδανικού ανιχνευτή απείρων διαστάσεων περιορίζεται από τις στατιστικές διακυμάνσεις.

Παράδειγμα: Για $E_c=11.8$ MeV και έσχατο όριο ανίχνευσης $E_k=0.5$ MeV και μήκους τροχιάς 176 cm/GeV, καλύτερη διακριτική ικανότητα ~

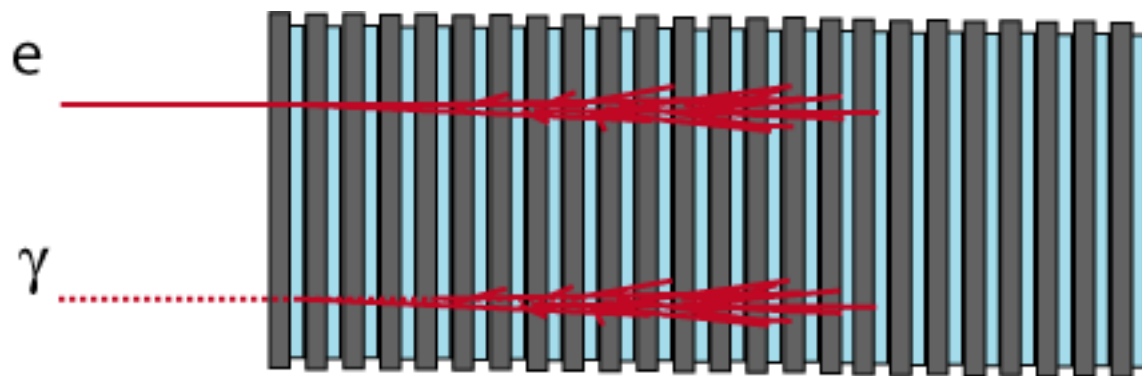
$$\sigma(E)/E = 0.007 / \sqrt{E(\text{GeV})}$$

Απώλειες διακριτικής ικανότητας:

- καταιγισμός δεν περιορίζεται στον ανιχνευτή → διακυμάνσεις της ενέργειας διαρροής; Διαμήκη απώλειες είναι μεγαλύτερες από τις εγκάρσιες απώλειες.
- Στατιστικές διακυμάνσεις στον αριθμό των φωτοηλεκτρονίων που παρατηρούνται στον ανιχνευτή. Αν $\alpha_p = N_p/E_0$ είναι # φωτοηλεκτρ. ανά μονάδα αρχικής E_0 , $[\sigma(E)/E]_{PE} = 1/\sqrt{\alpha E_0}$
- Διακυμάνσεις δειγματοληψίας αν ο ανιχνευτής περιέχει ανενεργά υλικά (inactive absorber).
- Αν ενεργή περιοχή είναι αέριο ή υγρό, χαμηλής E , e- σκεδάζονται σε μεγάλες γωνίες από τον άξονα καταιγισμού.

Τύποι ΗΜ Καλοριμέτρων (1)

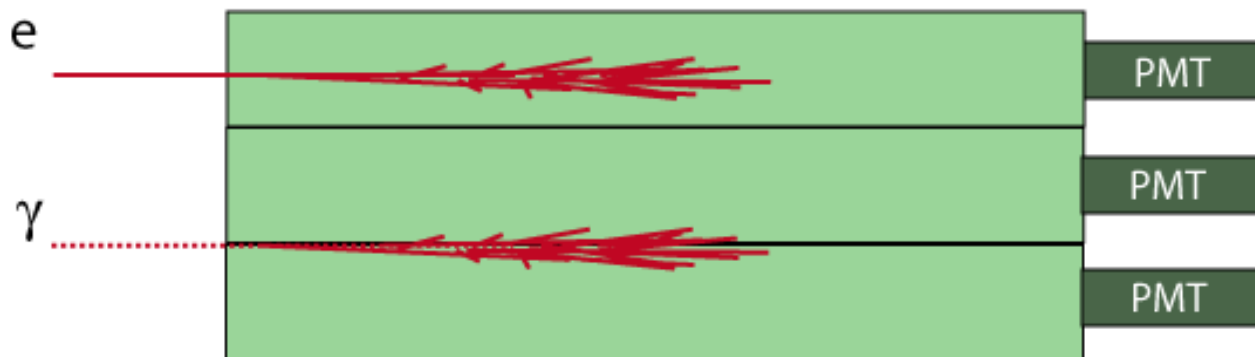
- Καλορίμετρο “Pb-σπινθηριστών sandwich”



Energy resolutions:

$$\sigma_E/E \sim 20\%/\sqrt{E}$$

- Εξωτικοί κρύσταλλοι (BGO, PbW, ...)



$$\sigma_E/E \sim 1\%/\sqrt{E}$$

- Καλορίμετρο υγρού $\sigma_E/E \sim 18\%/\sqrt{E}$

Αδρονικό Καλορίμετρο

Όταν ένα σωματίδιο που αλληλεδράζει αδρονικά πάνω από 5 GeV, εισέρχεται στην ύλη, τότε συμβαίνουν ελαστικές και μη-ελαστικές σκεδάσεις ανάμεσα στο σωματίδιο και στα νουκλεόνια.

Δευτερεύοντα αδρόνια → παράδειγμα: π and K mesons, p, n.
Ενέργεια από το πρωτεύων πάει στο δευτερεύων, μετά στο τριτεύων, κλπ.

Κатаιγισμός σταματά όταν η αδρονική ενέργεια είναι αρκετή μικρή για να σταματήσει λόγω απώλειας με ιοντισμό ή πυρηνική απορρόφηση.

Αδρονικός Καταιγισμός: μέγεθος καθορίζεται από nuclear absorption length λ_N . Σύγκριση X_0 για υλικά με μεγάλα Z. Το μέγεθος για αδρονικά Καλορίμετρα > για ΗΜ καλορίμετρα.

material	X_0 (g/cm ²)	λ_n (g/cm ²)
H ₂	63	52.4
Al	24	106
Fe	13.8	132
Pb	6.3	193

CMS Hadron Calorimeter

