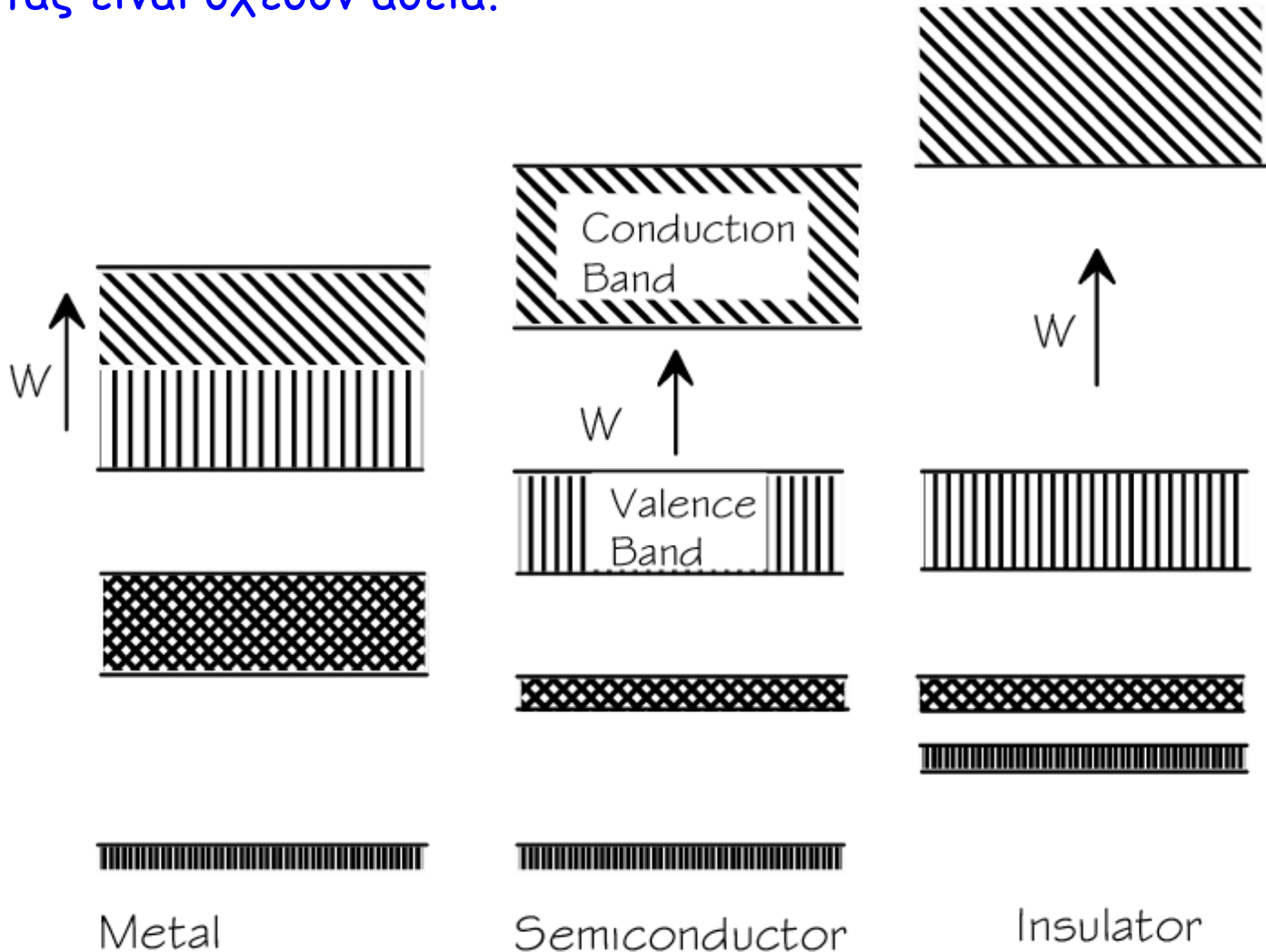


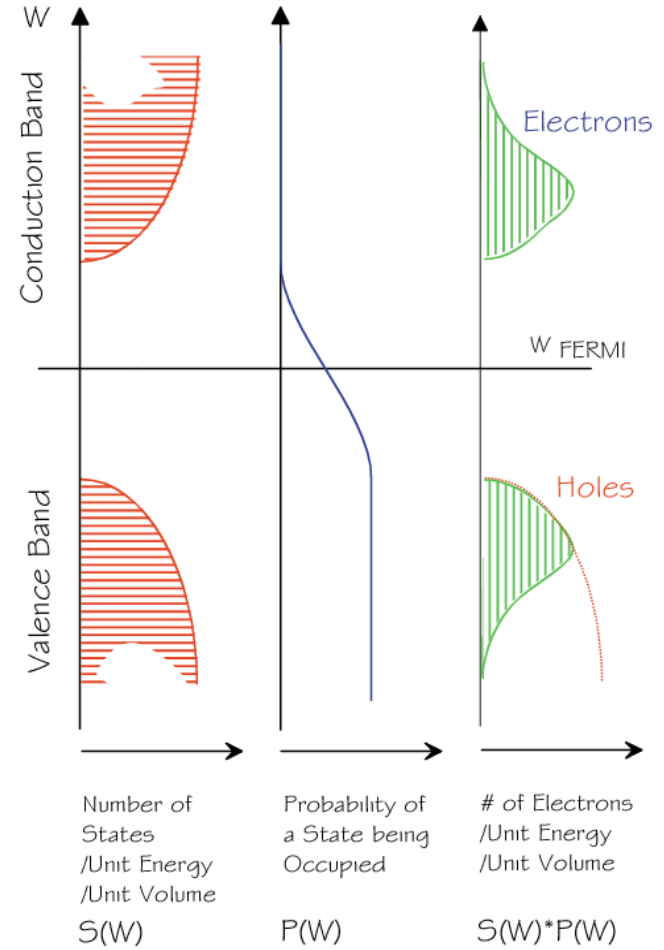
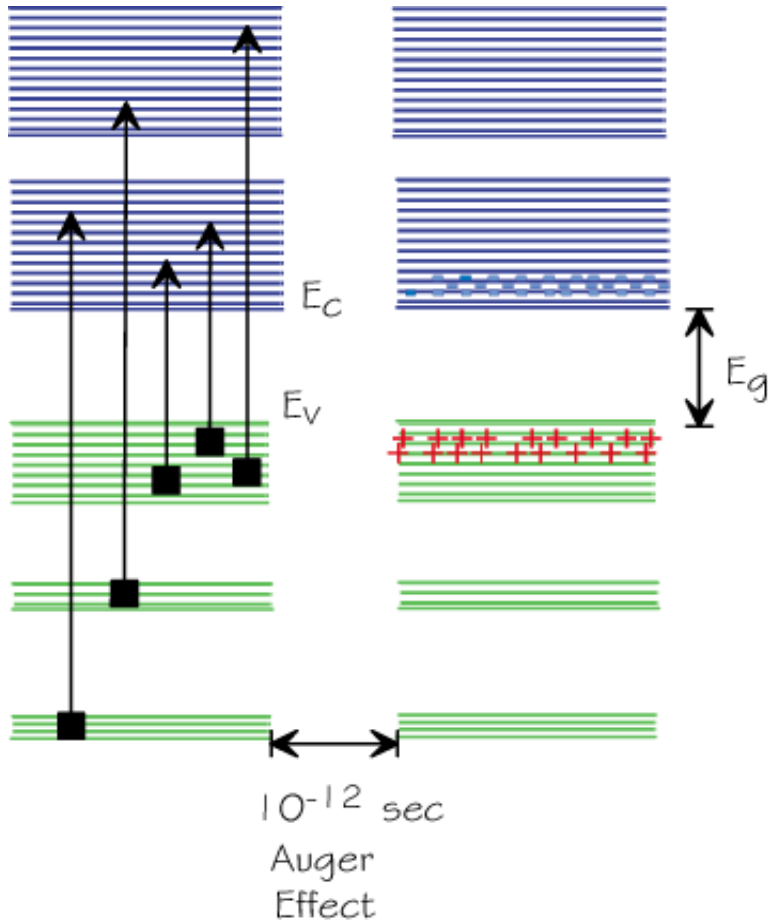
Ανιχνευτές Στερεάς Κατάστασης

- Στα μέταλλα μια ζώνη είναι μερικά γεμάτη.
- Στους ημιαγωγούς η ζώνη σθένους είναι σχεδόν γεμάτη και η ζώνη αγωγιμότητας είναι σχεδόν άδεια.



Ανιχνευτές Στερεάς Κατάστασης

Διέγερση ημιαγωγού



Number of States /Unit Energy /Unit Volume $S(W)$

Probability of a State being Occupied $P(W)$

of Electrons /Unit Energy /Unit Volume $S(W)*P(W)$

Ένα ηλεκτρόνια από εξωτερικό φλοιό μεταπηδά σε κάποια κενή θέση και ελευθερώνει ένα ηλεκτρόνιο από τον εξωτερικό φλοιό.

$$S(W) \propto W^{\frac{1}{2}} \quad P(W) \propto \exp\left\{-\frac{W - W_F}{kT}\right\}$$

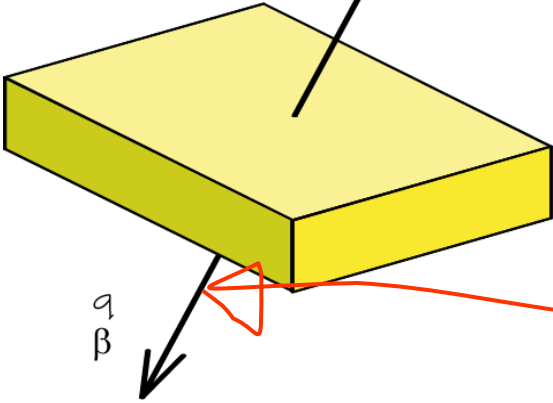
W_F = Fermi Level
= η ενέργεια όπου $P(W)=1/2$

Ανιχνευτές Στερεάς Κατάστασης

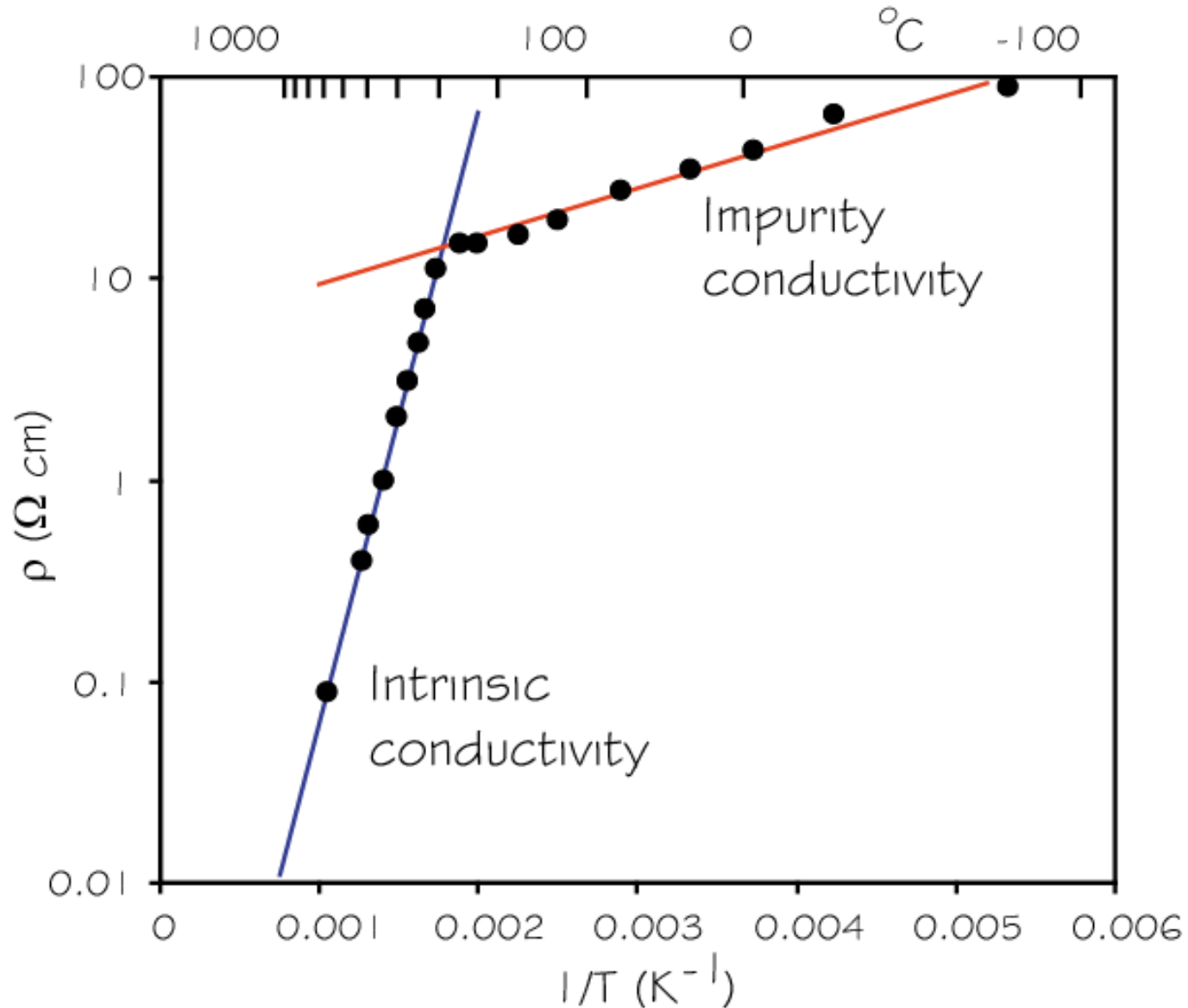
Παίρνουμε ένα κρύσταλλο από Si
 $10 \times 10 \times 0.3 \text{ mm}^3$

	αγωγιμότητα	
Ge	$\leq 0.49 \text{ } \Omega\text{m}$	στους 300K
Si	$\sim 100 \text{ } \Omega\text{m}$	λόγω προσμίξεων

$\sim 4-5 \cdot 10^8$ ελεύθεροι φορείς
Ένα ΜΙΡ παράγει $\sim 3-4 \cdot 10^4$ e-h ζεύγη



Ανιχνευτές Στερεάς Κατάστασης



Electric conductivity of pure silicon as function of the temperature. Phys. Rev., 75, 865 (1949)

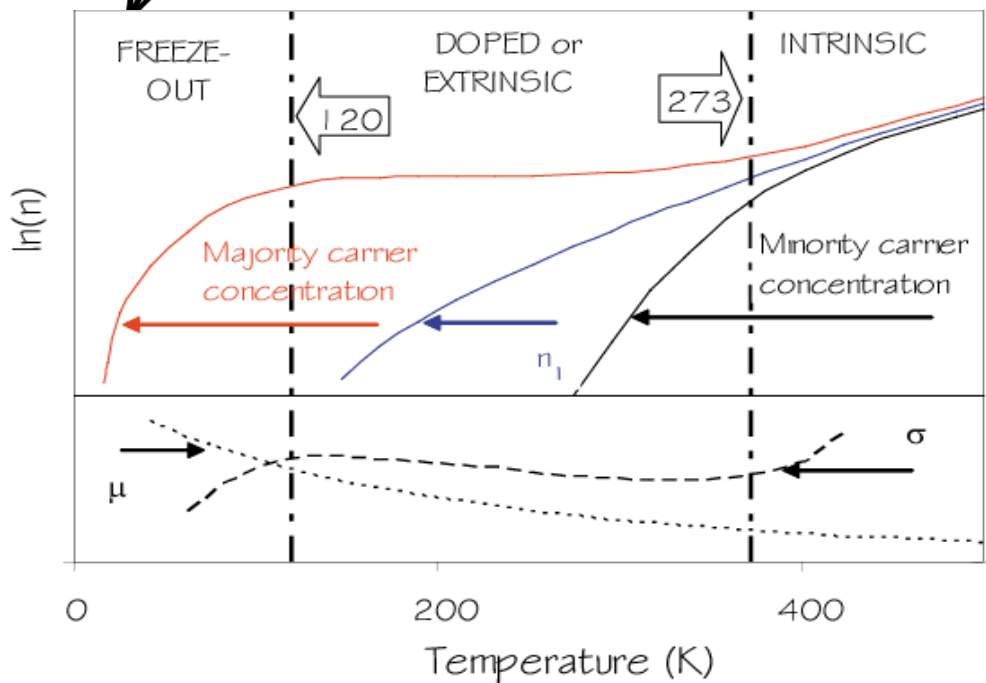
ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Παίρνουμε ένα κρύσταλλο από Si
 $10 \times 10 \times 0.3 \text{ mm}^3$

Ge	αγωγιμότητα	≤ 0.49 Ωm	στους 300K
Si		~100 Ωm	λόγω προσμίξεων

~4-5 10^8 ελεύθεροι φορείς
 Ένα ΜΙΡ παράγει ~3-4 10^4 e-h ζεύγη

a
β



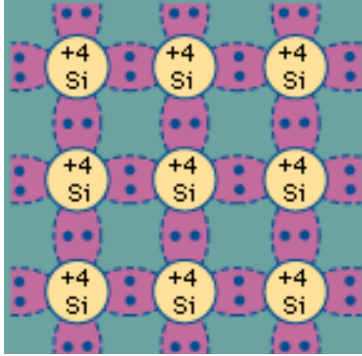
Πρέπει να μειώσουμε τον αριθμό των ελεύθερων φορέων. Freeze out:

Mobility, μ , conductivity, σ , πλειοψηφία [δότες (e) δέκτες (holes)] και μειοψηφία [δότες (holes) δέκτες (e)] συγκέντρωσης φορέων ως συνάρτηση της θερμοκρασίας.
 n_i η ενδογενής πυκνότητα φορέων.

Η προσμίξεις



Ανιχνευτές Στερεάς Κατάστασης



Τα ηλεκτρόνια στο Si:

K 2
 L 8
 M 4 + 4 "μοριακός δεσμός" → 8
 $E_g \approx 1 \text{ eV}$

Ημιαγωγός με προσμίξεις.

n-Type

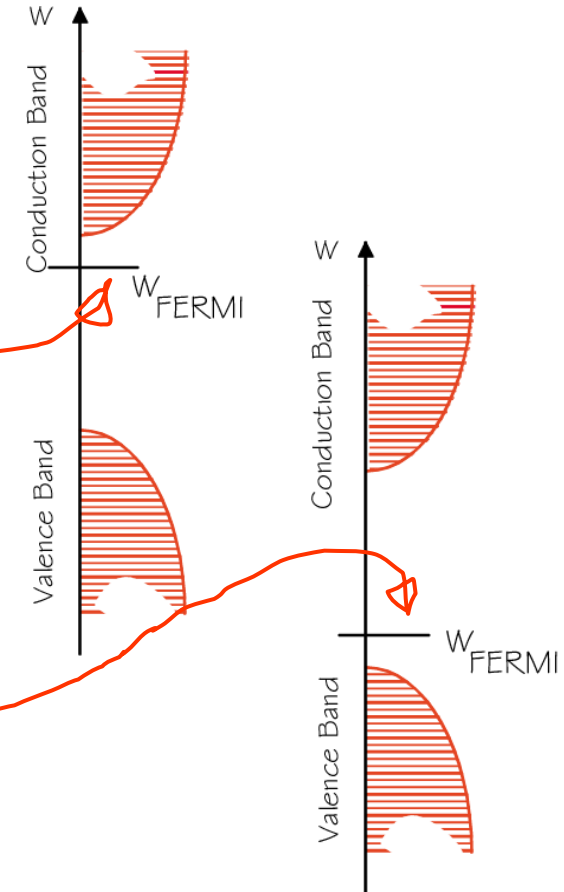
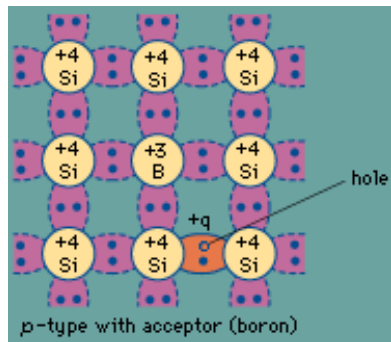
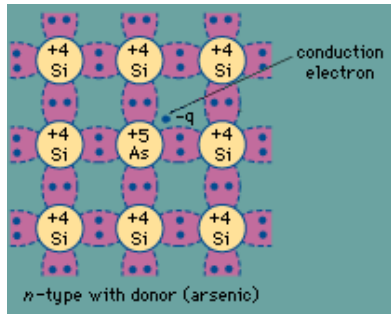
P, As, Sb

5 ηλεκτρόνια στον M-φλοιό
 → 1 ηλεκτρόνιο με ενέργεια
 σύνδεσης 10-50 meV

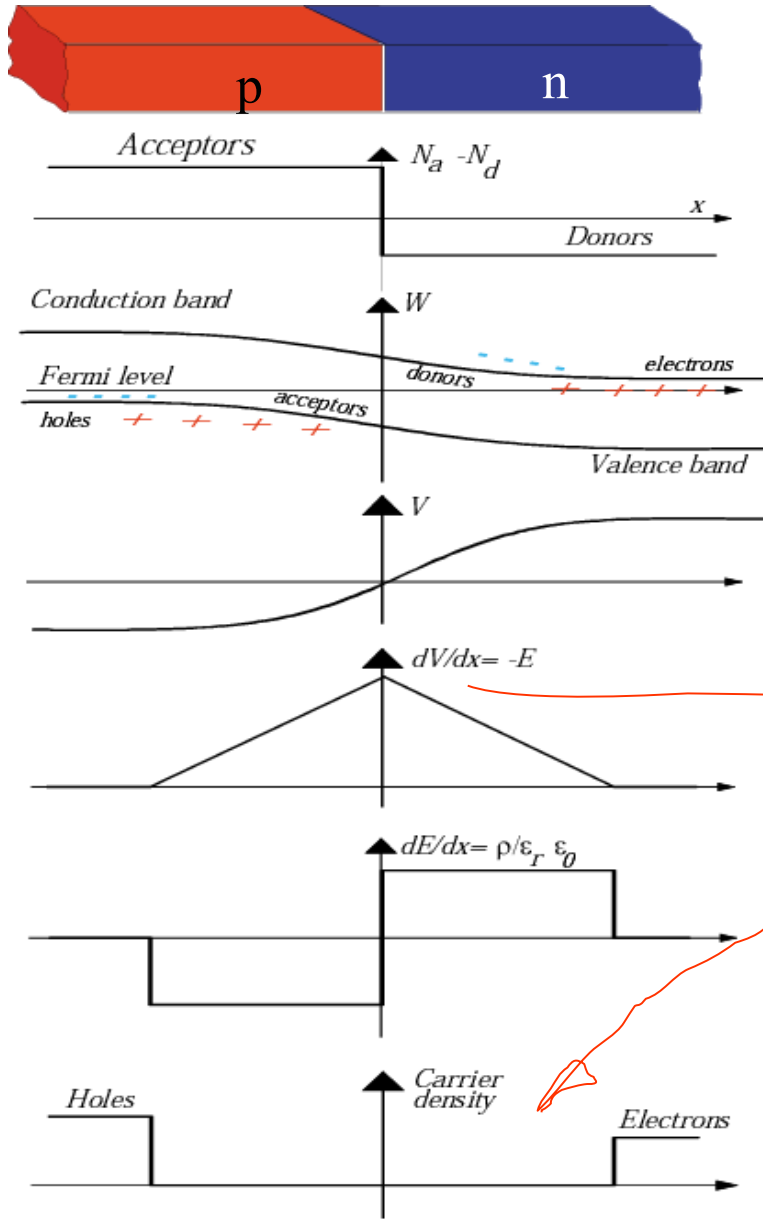
p-Type

B, Al, Ga

3 ηλεκτρόνια στον M-φλοιό
 → λείπει 1 ηλεκτρόνιο



ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

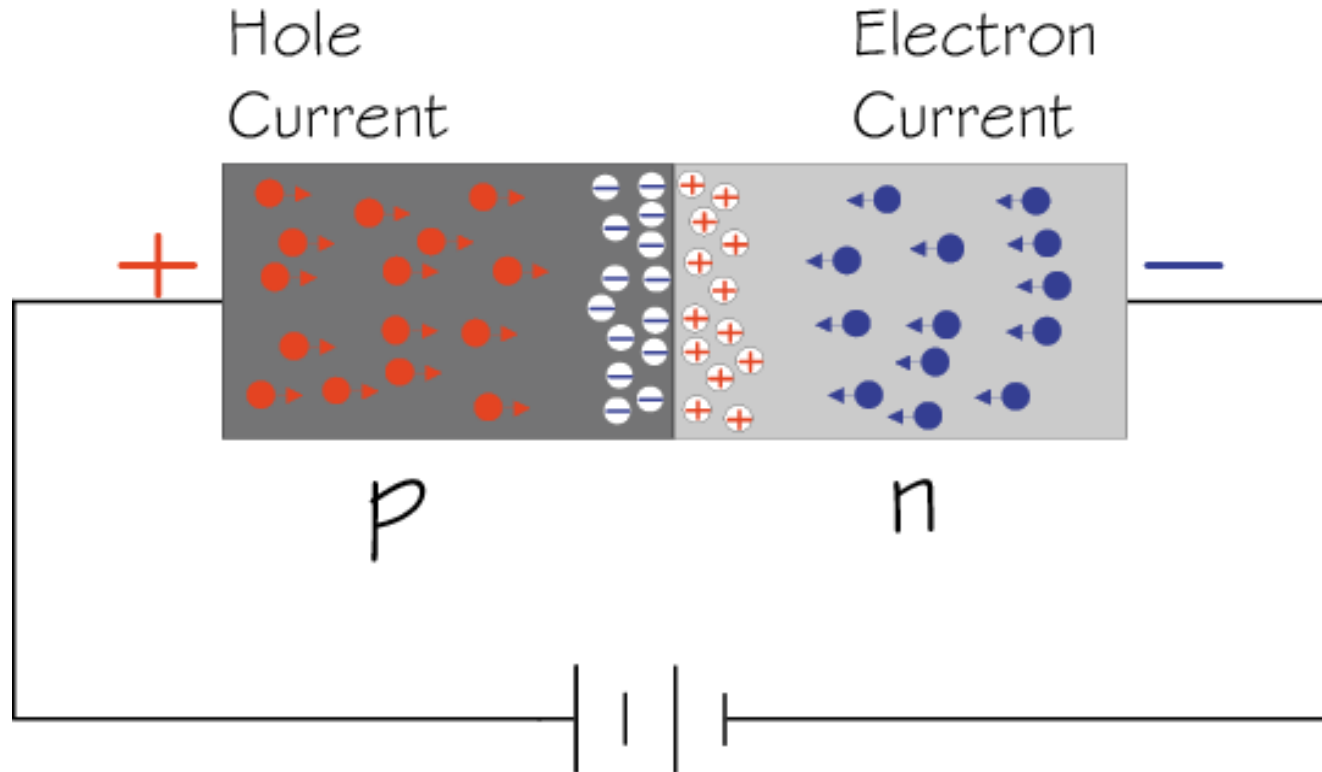


Επαφή p-n χωρίς τάση:

- Μέγιστο ηλεκτρικό πεδίο στο όριο μεταξύ των ζωνών p και n.

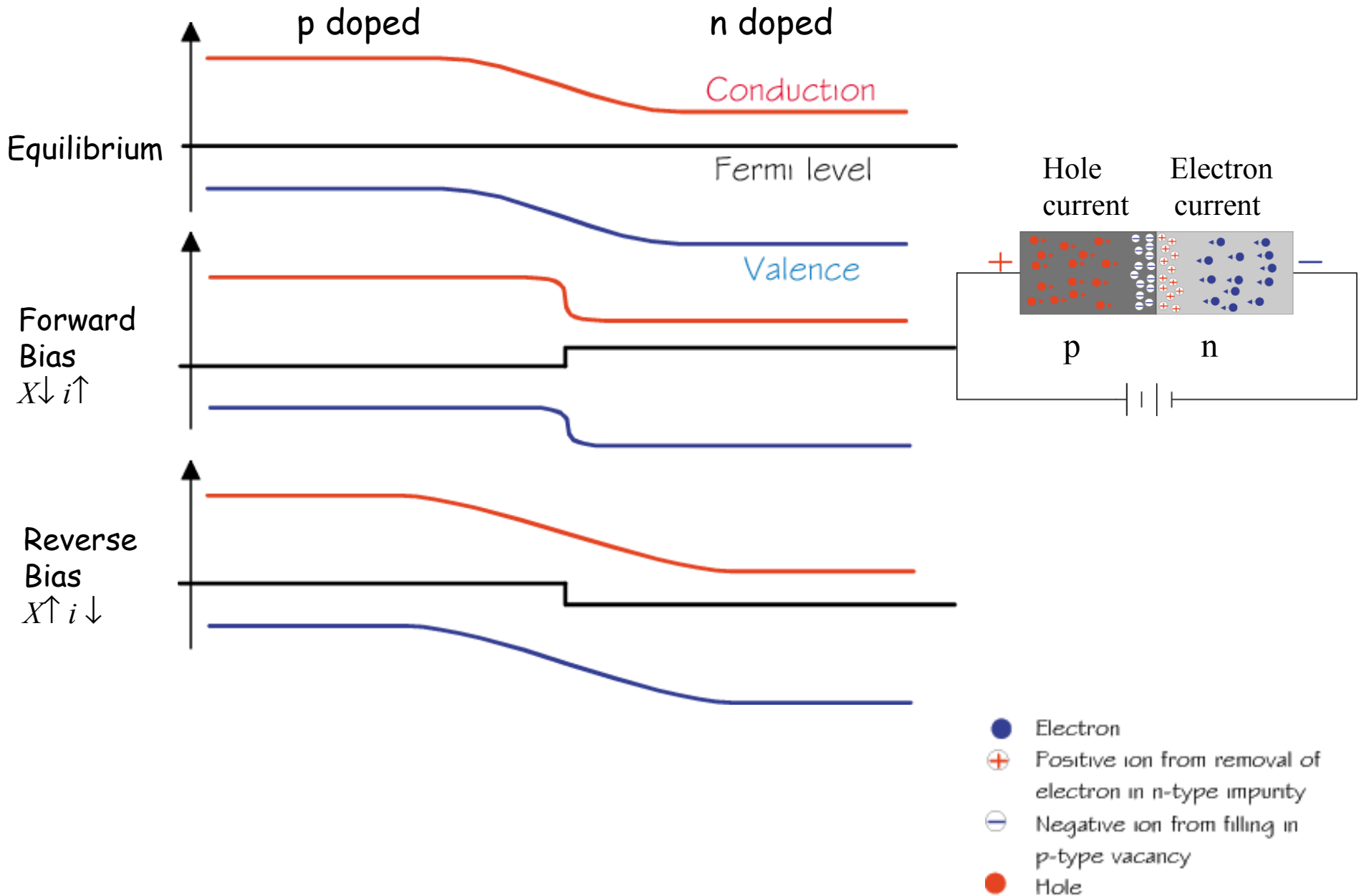
- καθαρή ζώνη πρόσμιξης.

Ανιχνευτές Στερεάς Κατάστασης

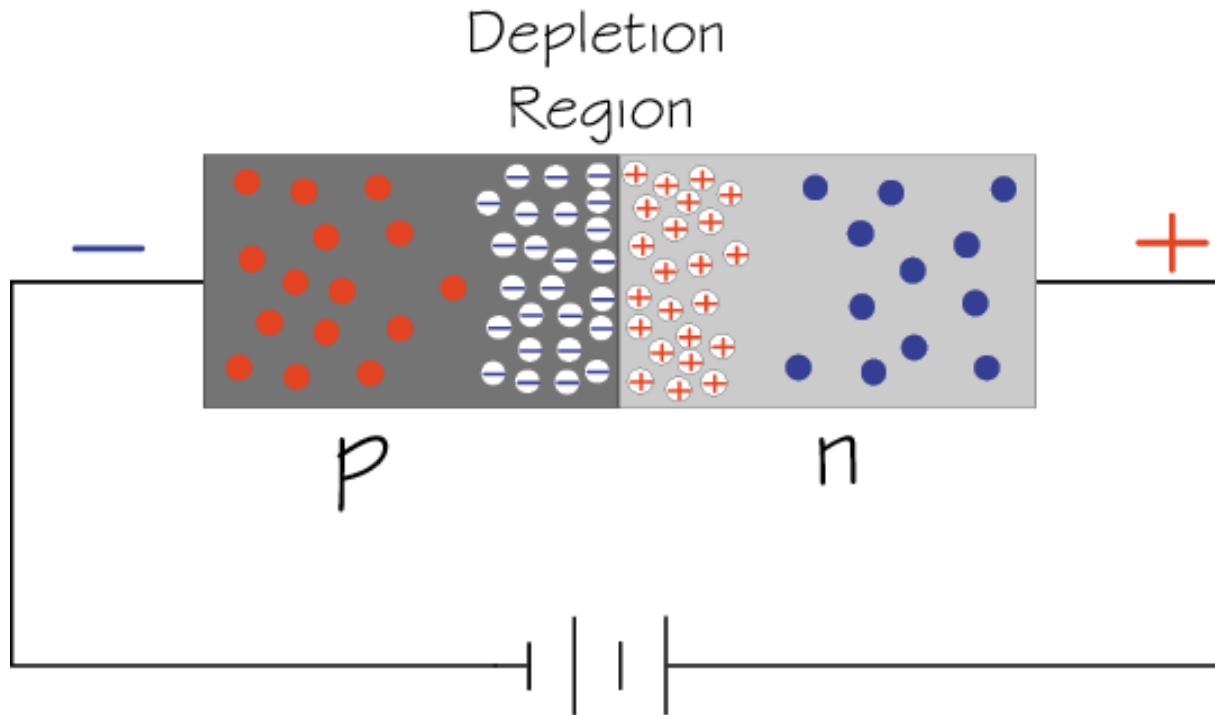


- Electron
- ⊕ Positive ion from removal of electron in n-type impurity
- ⊖ Negative ion from filling in p-type vacancy
- Hole

ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

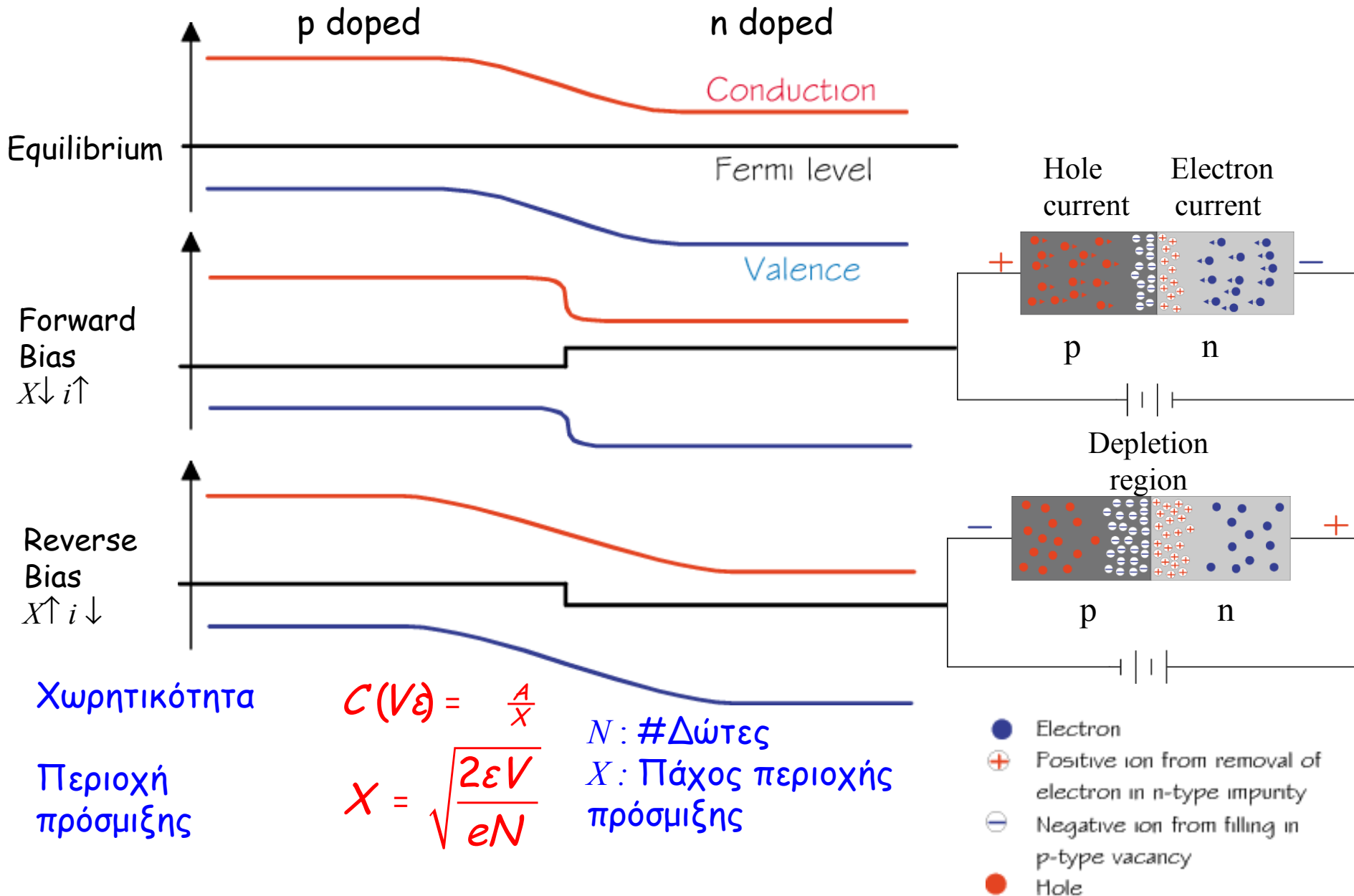


Ανιχνευτές Στερεάς Κατάστασης

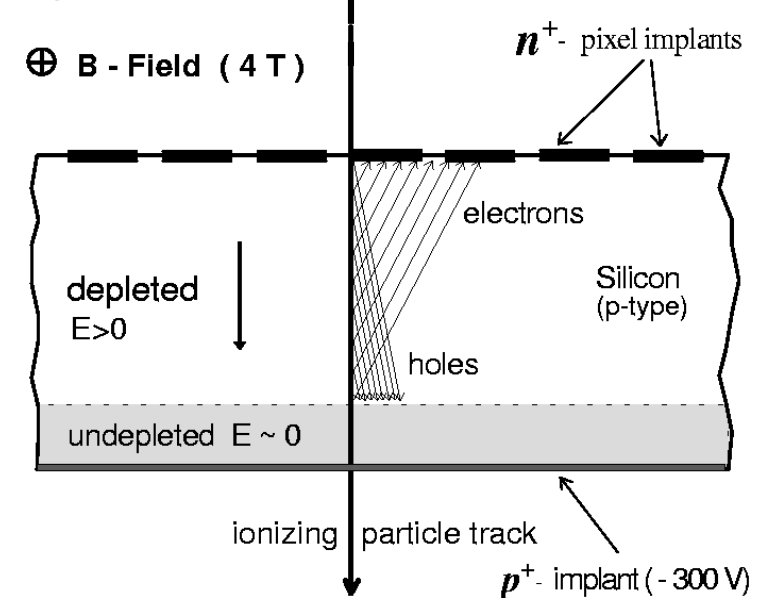
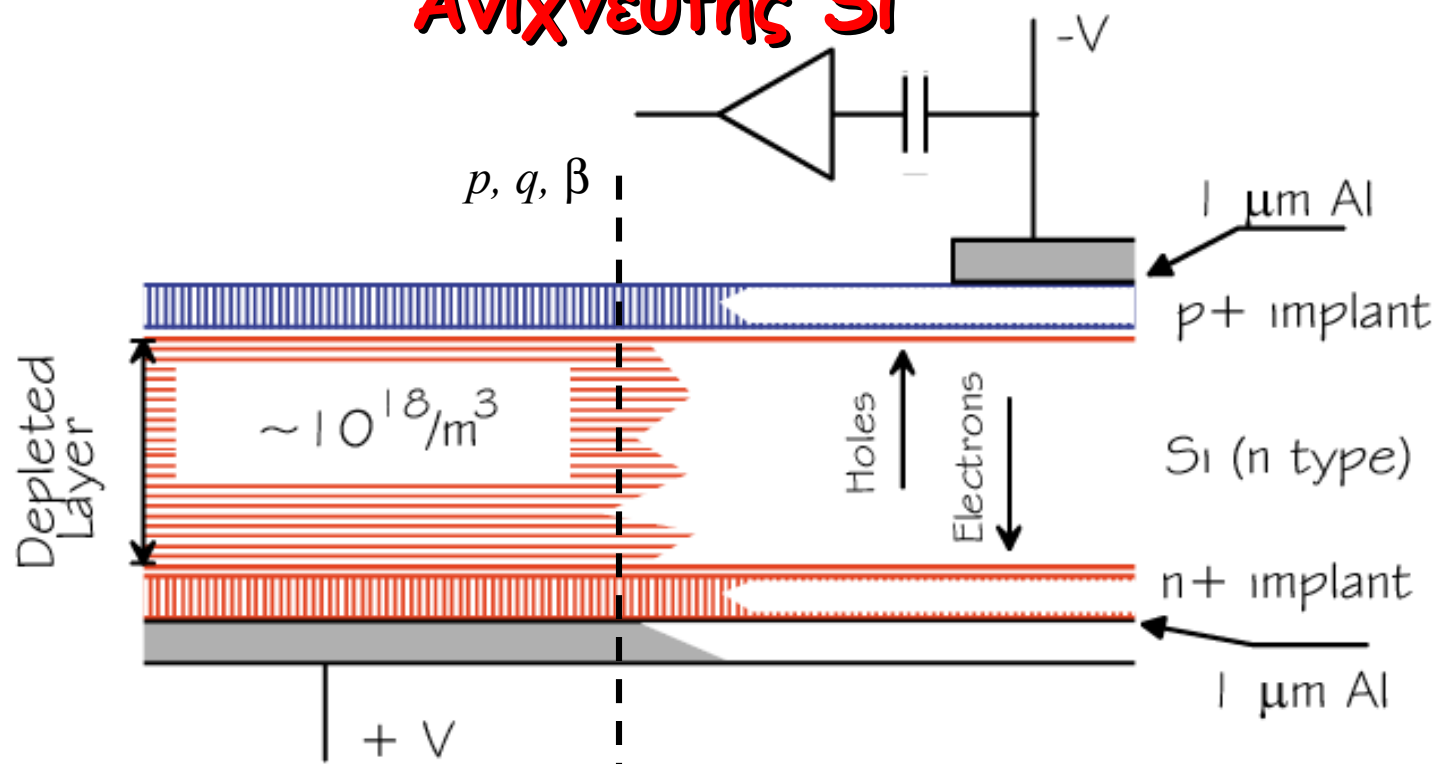


- Electron
- ⊕ Positive ion from removal of electron in n-type impurity
- ⊖ Negative ion from filling in p-type vacancy
- Hole

ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

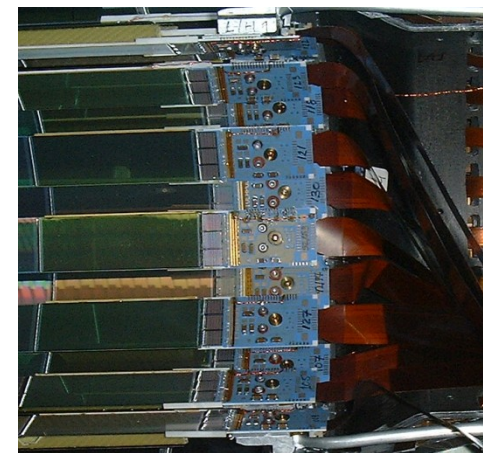



ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ Si

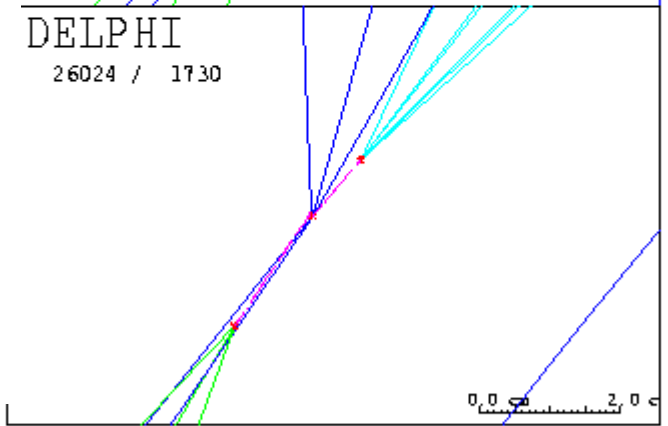
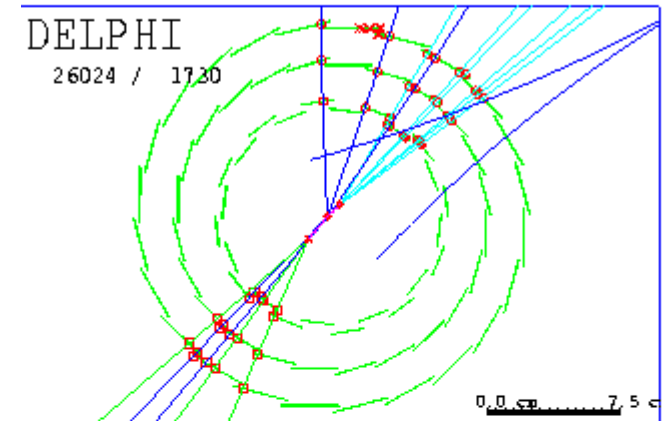
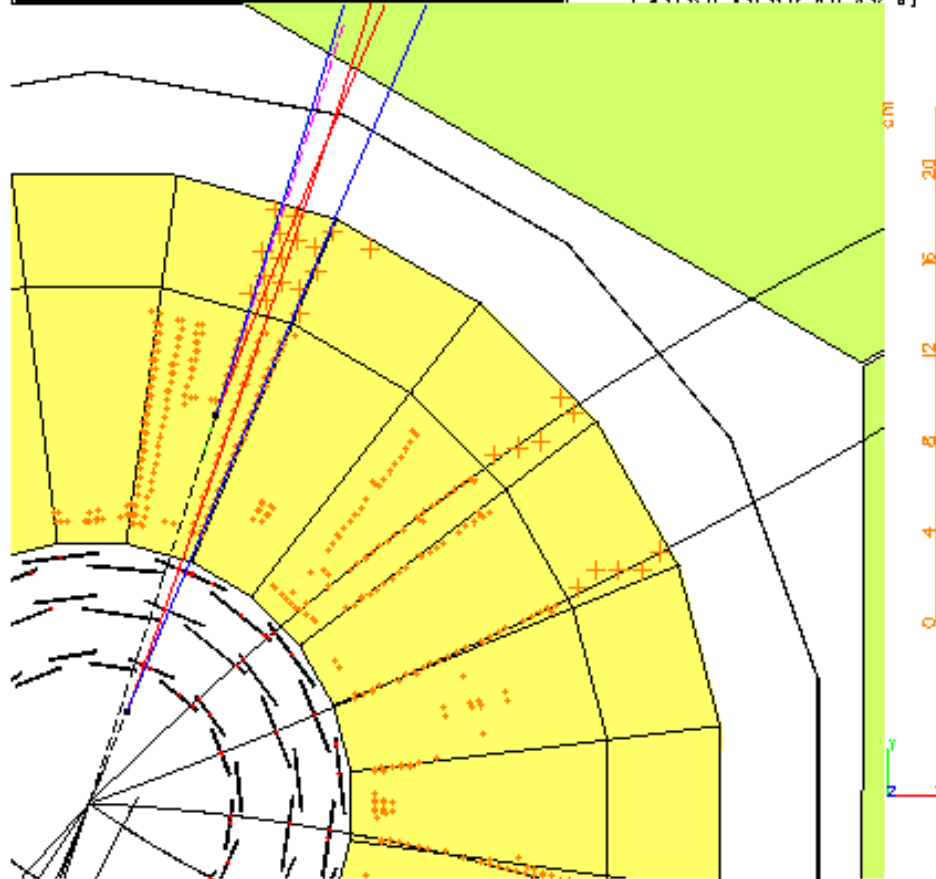


Ανιχνευτής Si

DELPHI Vertex Detector

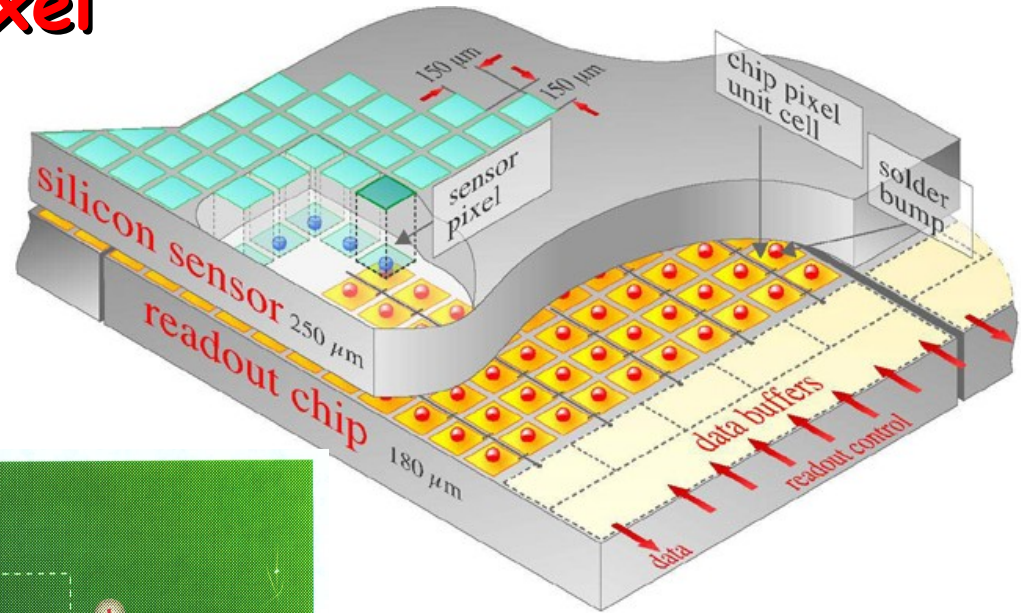


	DELPHI	Run: 48139	Evt: 1831								
	Beam: 456 GeV	Proc: 3-Jun-1996	Act: 143	0	1	14	0	0	0	0	0
	DAS: 10-Jul-1994	Scam: 12-Jun-1996	Beat: 147	5	194	11	51	83	11	14	0
	0819.57	Tanagra		4	4	1	0	0	0	0	0



Διασπάσεις B

Ανιχνευτής Pixel



A cross-sectional diagram of a silicon detector. It shows an aluminium layer on top, followed by high resistivity silicon, and a p-type silicon layer. A charged particle is shown entering from the top, creating electron-hole pairs. An electric field is applied across the silicon, causing the electrons and holes to drift towards the readout electronics. The readout electronics are shown as a pixel readout and an electronics chip, connected to the silicon sensor via flip chip bonding. A green arrow labeled 'charged particle' points to the particle's path.

aluminium layer
high resistivity silicon
p type silicon
flip chip bonding
pixel readout
electronics chip

electron hole

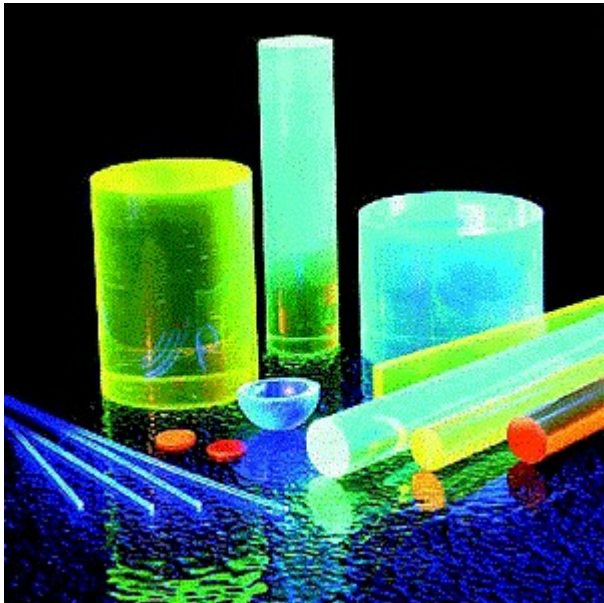
charged particle

Particle detection using silicon

When a charged particle crosses the silicon, in the order of 10 000 free electrons and holes are created. If an electric field is applied, those electrons are collected. They produce a pulse visible to the readout electronics.

performed by
GEC
Marconi Materials LTD
Caswell . UK .

Σπινθηριστές



Σπινθηριστές

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

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

Η χρονική εξέλιξη της διαδικασίας επανεκπομπής περιγράφεται από:

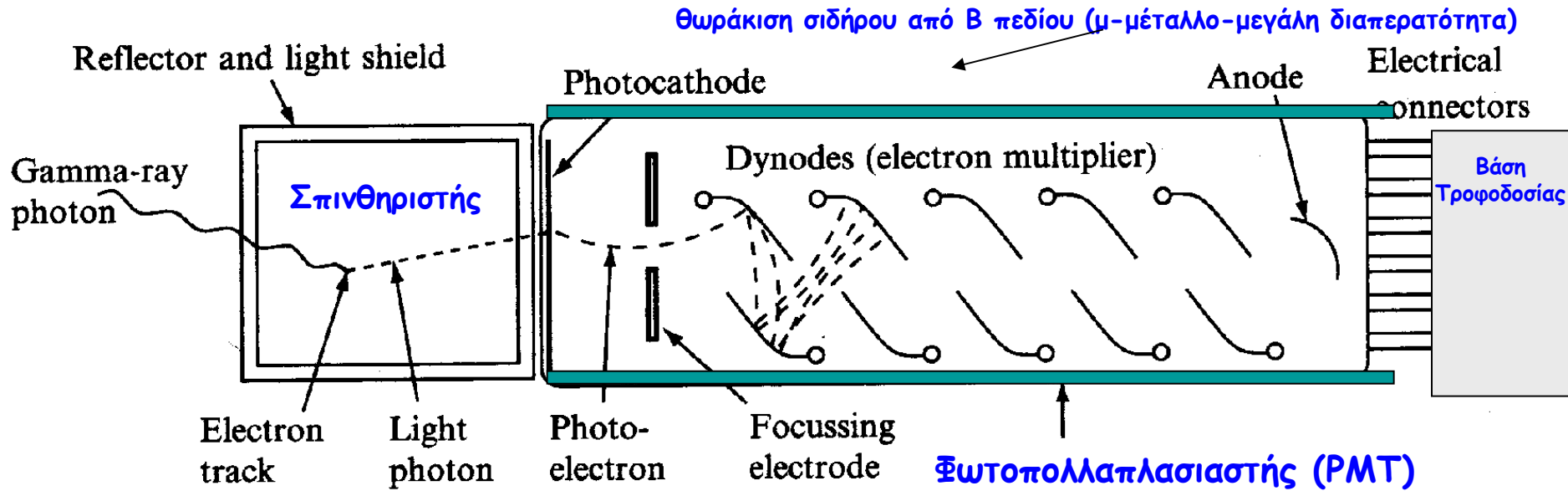
$$N = \frac{N_0}{\tau_d} e^{-t/\tau_d}$$

N = αριθμός φωτονίων που εκπέμπονται σε χρόνο t

N_0 = ολικός αριθμός εκπεμπομένων φωτονίων

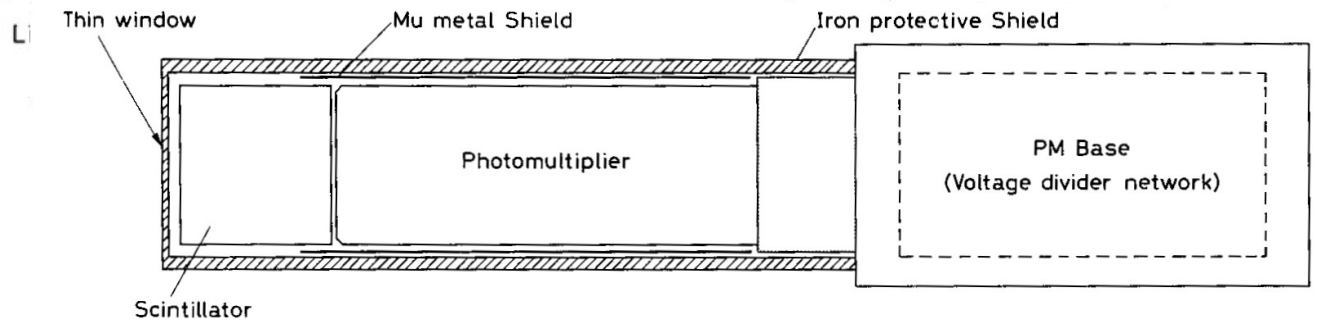
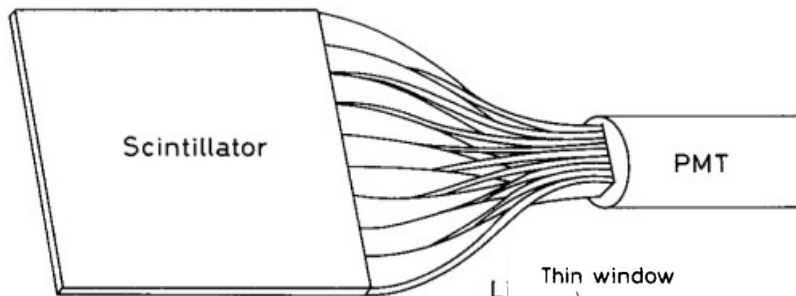
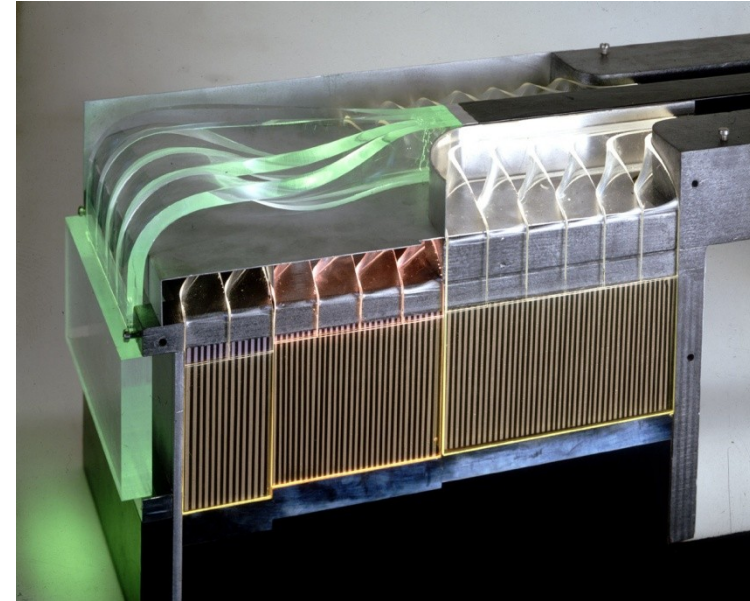
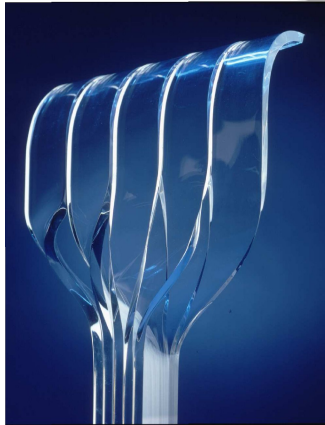
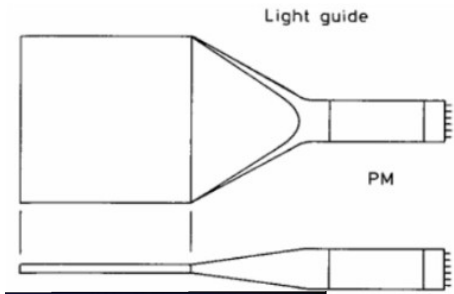
τ_d = σταθερά αυτοδιέγερσης, αντιστοιχεί στο χρόνο που απαιτείται για την εκπομπή $1 - e^{-1} = 63\%$ φωτονίων.

Σπινθηριστές



- 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.

Σπινθηριστές



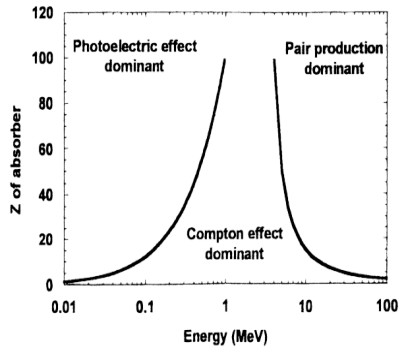
Σπινθηριστές

Σπινθηριστής + ΦΤ+ΒΤ = ανιχνευτής

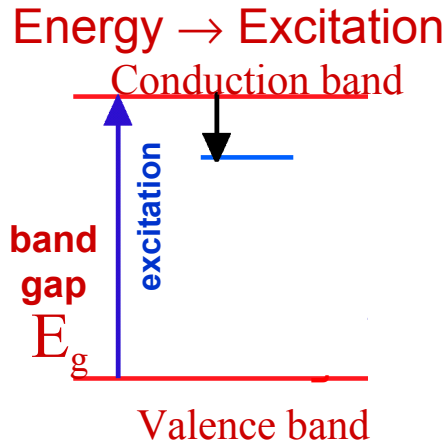
Πως δουλεύει;

απώλεια ενέργειας e.g. γ

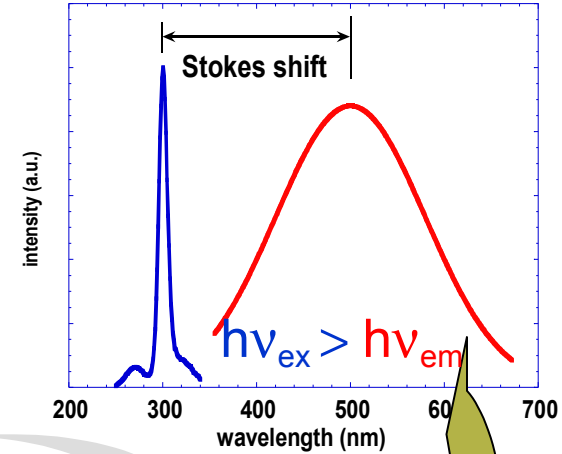
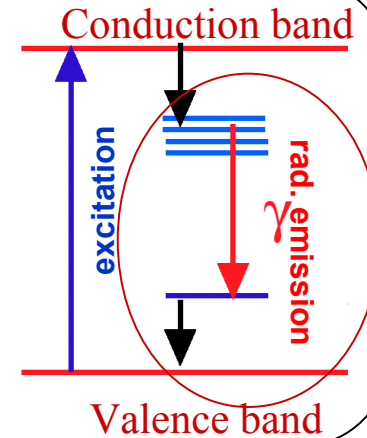
$$I(E) = I_0(E)e^{-\mu x}$$



μετατροπή ενέργειας



εκπομπή



Σπινθηριστές

- 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 ΦΠ.
 - Μικρή σταθερά αποδιέγερσης.
-
- Χρησιμοποιούνται 6 τύποι υλικά:
 - Οργανικοί κρύσταλλοι
 - Οργανικά υγρά
 - Πλαστικά υλικά
 - Ανόργανοι κρύσταλλοι
 - Αέρια
 - Γυαλιά

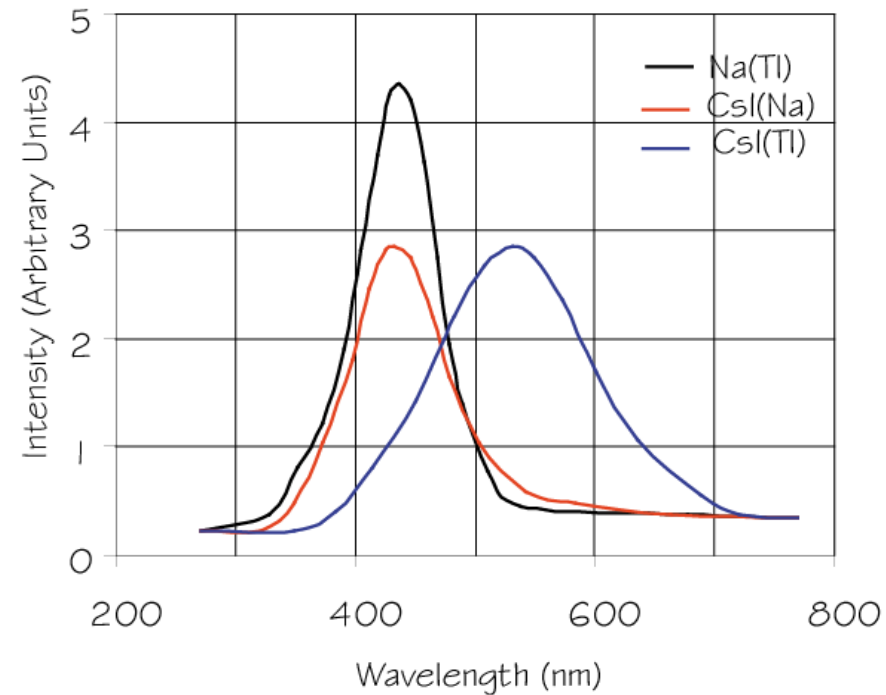
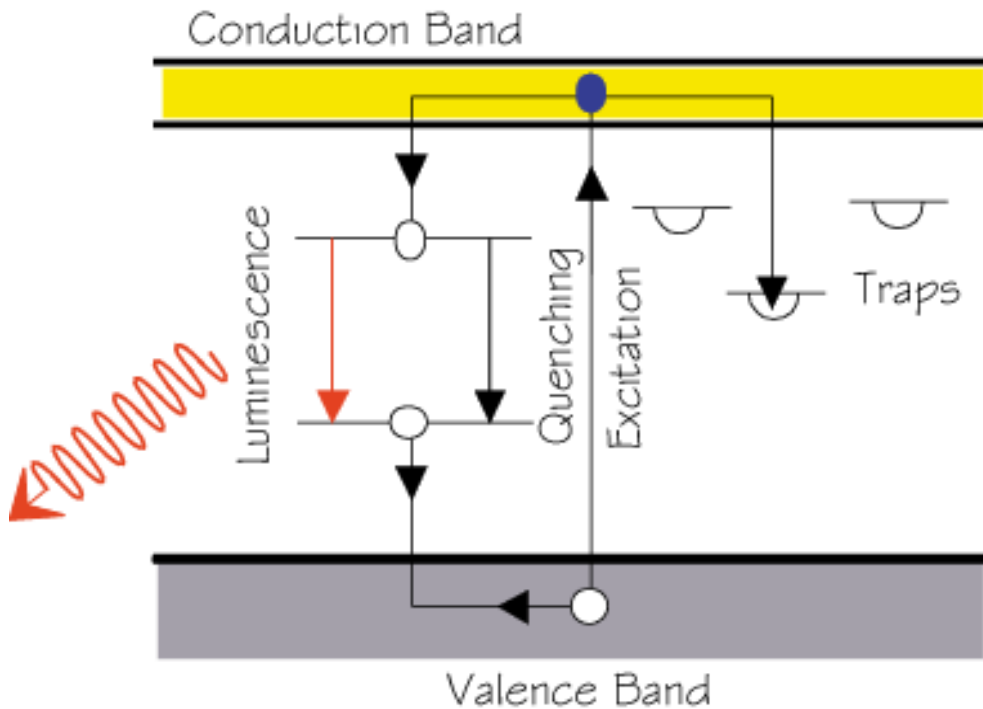
Ανόργανοι Σπινθηριστές

- Συνήθως είναι αλκαλικές ανώσεις με αλογόνα που περιέχουν μικρή πρόσμιξη **ενεργοποιητού**.
- NaI + πρόσμιξη Θαλίου (Tl), CsI (Tl), CsF_2 , CsI (Na), KI (Tl), LiI (Eu)
- Μη- Αλκαλικοί κρύσταλλοι: $\text{Bi}_4 \text{Ge}_3 \text{O}_{12}$ (BGO), BaF_2 , $\text{ZnS}(\text{Ag})$, CaWO_4
- Χρόνος απόκρισης: **Αργός ~ 500 ns**
- Βασικό μειονέκτημα: **Υγροσκοπικότητα** πλην του CsI (Tl)
- 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).
- BaF_2 : έχει μια ταχύτερη συνιστώσα φωτός στο υπεριώδες (UV) χρόνο αποδιέγερσης ~ 500 ps έξοδος φωτός χαμηλή.

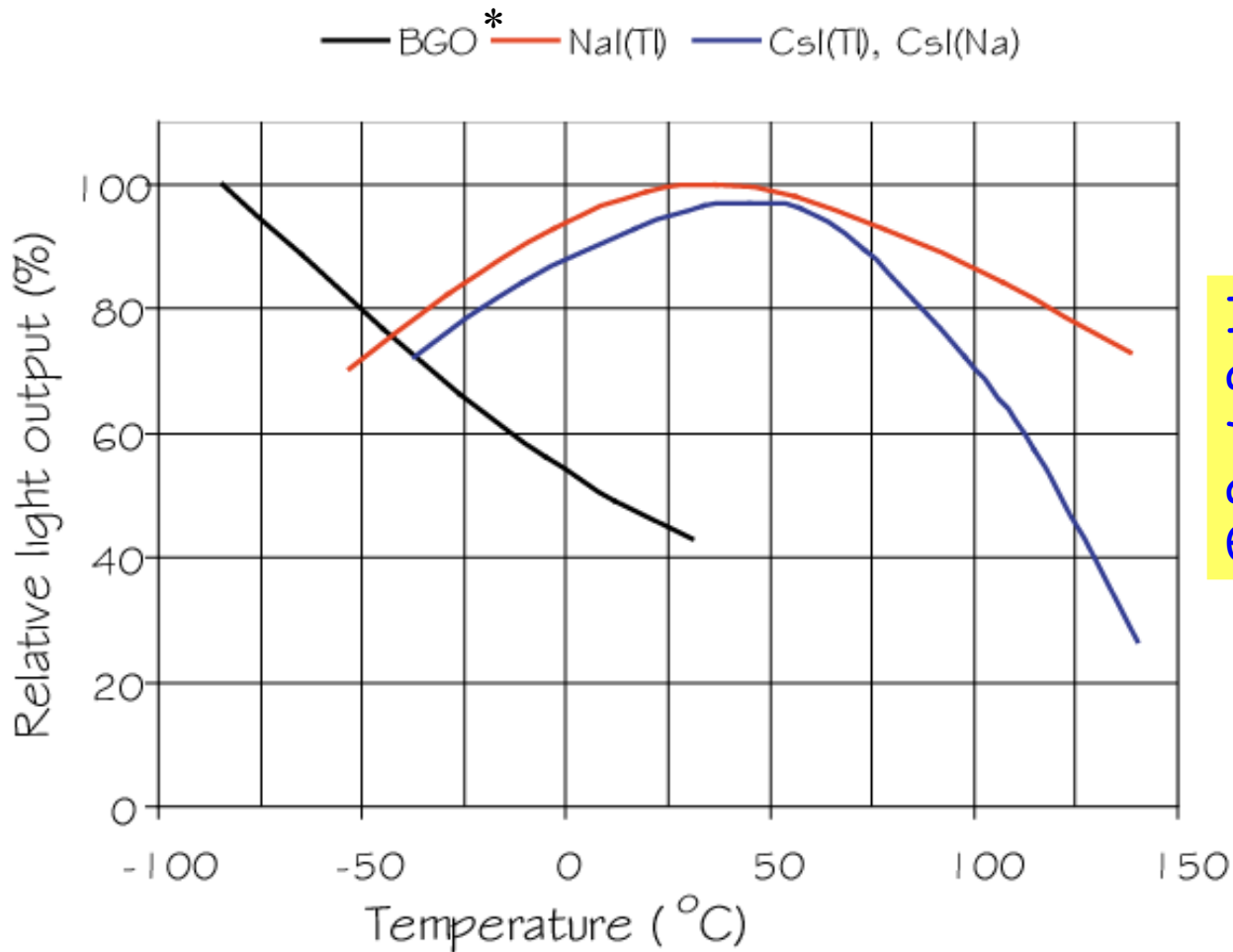
Ανόργανοι Σπινθηριστές

Ο πιο διαδεδομένος ανόργανος σπινθηριστής είναι το NaI(Tl) .

Οι ενεργειακές ζώνες σε ένα κρύσταλλο με προσμείξεις



Ανόργανοι Σπινθηριστές

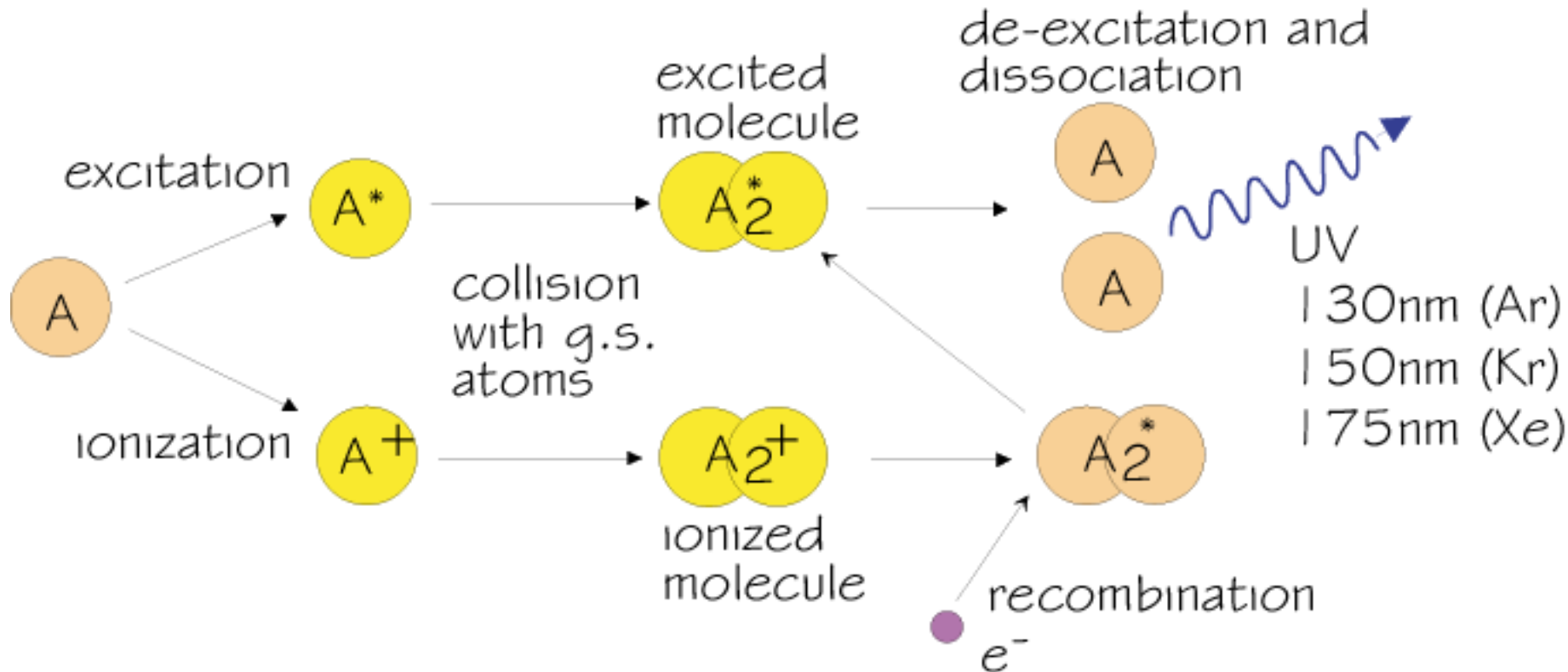


Ισχυρή εξάρτηση της απόδοσης φωτός και της σταθεράς αποδιέγερσης από τη θερμοκρασία.

* Bismuth germinate $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$

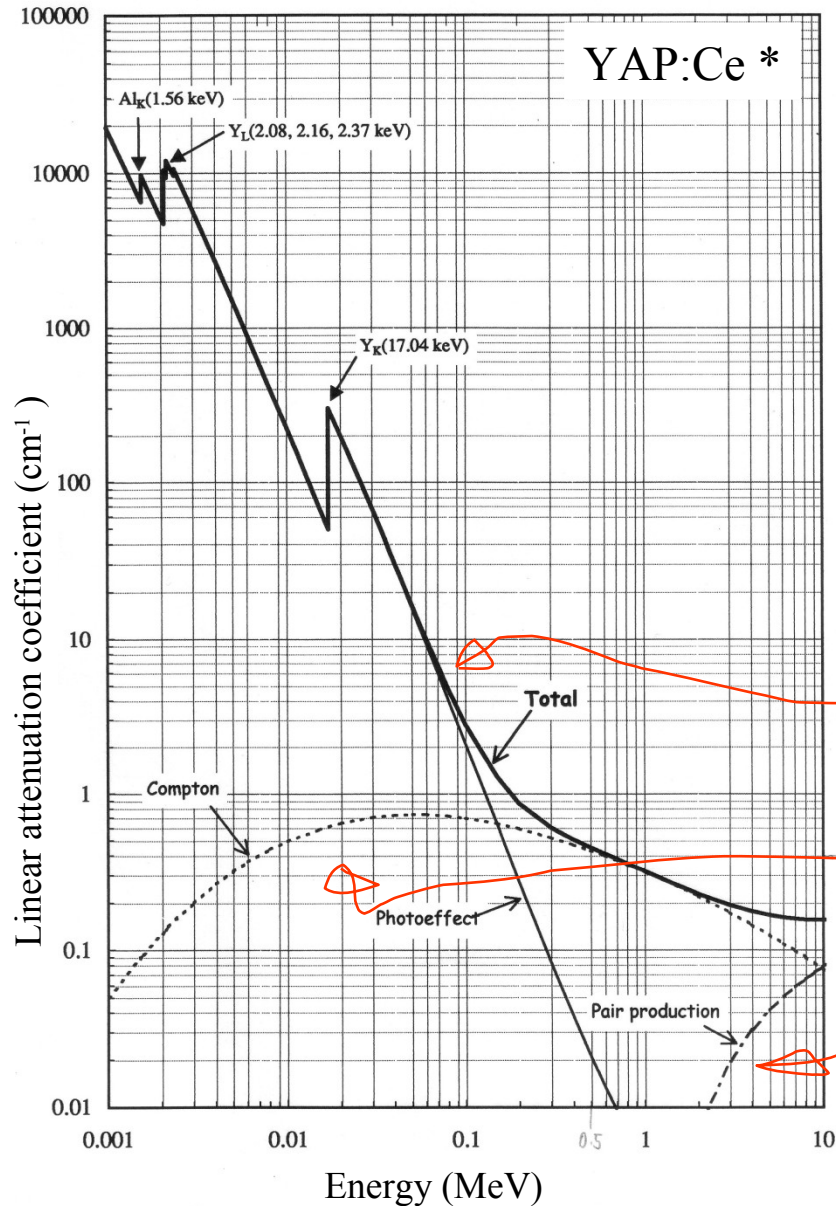
Ανόργανοι Σπινθηριστές

Υδροποιημένα ευγενή αέρια: LAr, LXe, LKr



Βρίσκουμε 2 σταθερές αποδιέγερσης : από μερικά ns μέχρι 1 μ s.

Απορρόφηση Φωτονίων



Η ένταση, I , μιας δέσμης ακτίνων γ καθώς περνά ένα στόχο πάχους d

$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

όπου μ οι 3 διαδικασίες:

Photoel. Abs.

$\rightarrow Z^4$ εως Z^5

Compton scatt.

$\rightarrow Z$

Pair production

$\rightarrow Z^2$

* YAP (Yttrium Aluminium Provskite $YAlO_3$) crystals

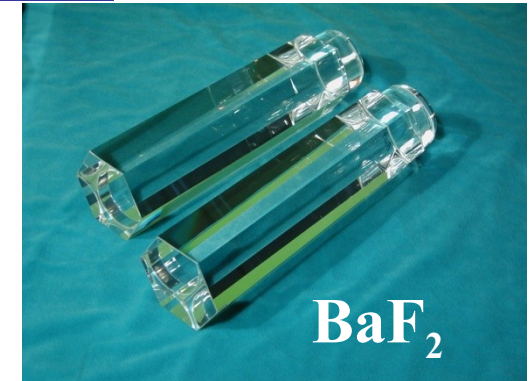
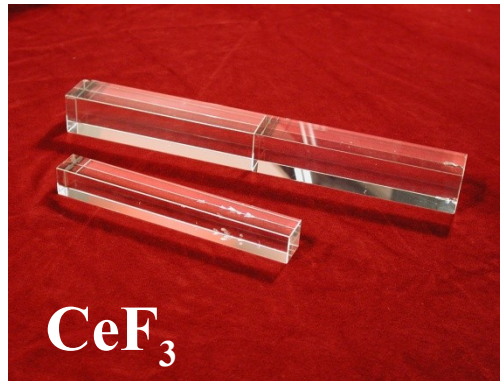
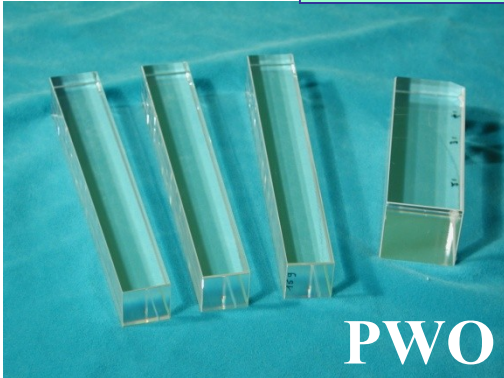
Ανόργανοι Σπινθηριστές

Scintillator composition	Density (g/cm ³)	Index of refraction	Wavelength of max.Em. (nm)	Decay time Constant (μs)	Scinti Pulse height ¹⁾	Notes
NaI(Tl)	3.67	1.9	410	0.25	100	2)
CsI	4.51	1.8	310	0.01	6	3)
CsI(Tl)	4.51	1.8	565	1.0	45	3)
CaF₂(Eu)	3.19	1.4	435	0.9	50	
BaF₂	4.88	1.5	190/220 310	0,0006 0.63	5 15	
BGO	7.13	2.2	480	0.30	10	
CdWO₄	7.90	2.3	540	5.0	40	
PbWO₄	8.28	2.1	440	0.020	0.1	
CeF₃	6.16	1.7	300 340	0.005 0.020	5	
GSO	6.71	1.9	430	0.060	40	
LSO	7	1.8	420	0.040	75	
YAP	5.50	1.9	370	0.030	70	

1) Relative to NaI(Tl) in %; 2) Hygroscopic; 3) Water soluble

Κρύσταλλοι

Αυτοί οι κρύσταλλοι παράγουν φως light!



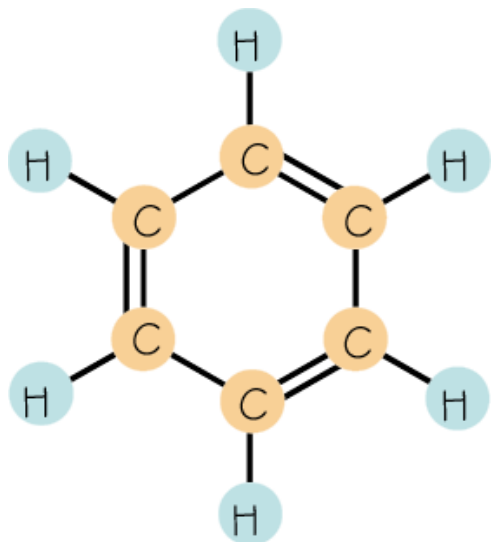
Κρύσταλλοι είναι τα υλικά για ηλεκτρομαγνητικά καλορίμετρα για να έχουμε ακρίβεια στις μετρήσεις



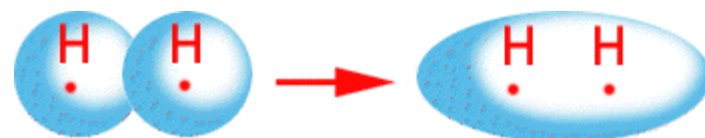
Οργανικοί Σπινθηριστές

- Οι οργανικοί σπινθηριστές είναι αρωματικές ενώσεις υδατανθράκων που περιέχουν συνδεδεμένες δομές βενζοϊκών δακτυλίων.
- Βραχύτατος χρόνος αποδιέγερσης $\sim \chi.ns$
- Το φως σπινθηρισμού στις ενώσεις αυτές προέρχεται από εκπομπές των ελευθέρων ηλεκτρονίων σθένους των μορίων.

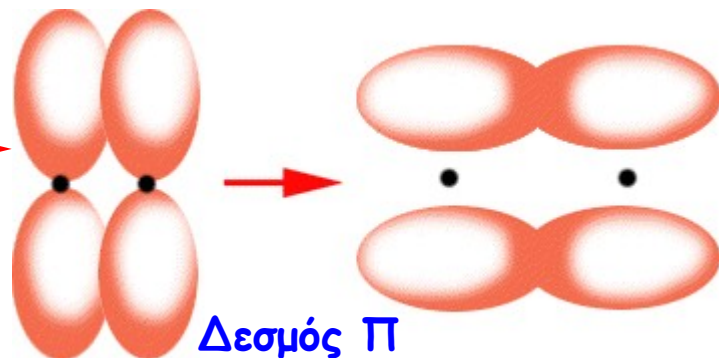
Βενζόλιο C_6H_6



Λίγη Χημεία ...



Απλός Δεσμός = δεσμός Σ

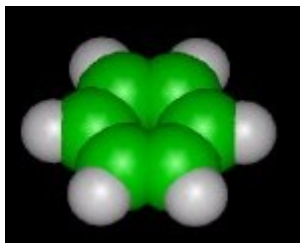


Δεσμός Π

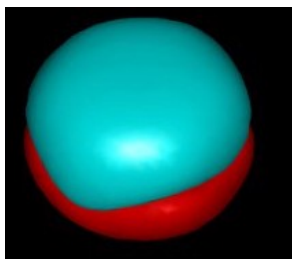
Διπλός Δεσμός = 1 Σ + 1 Π δεσμός

Οργανικοί Σπινθηριστές

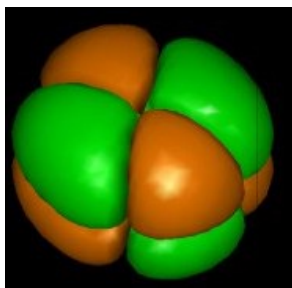
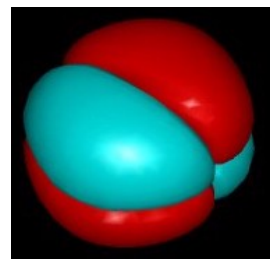
Πολλές από τις ιδιότητες των οργανικών μορίων, πχ το βενζόλιο, οφείλονται στα μοριακά τροχιακά.



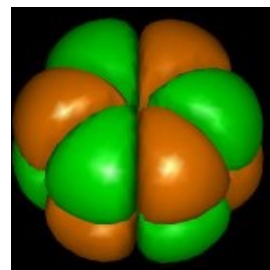
Αν έχουμε άτομα να παράλληλες τις p ατομικές τροχιές μπορούμε να πάρουμε πολλούς δεσμούς τύπου Π προσθέτοντας ή αφαιρώντας τα.



Υπάρχουν 6 π ηλεκτρόνια στο βενζόλιο που γεμίζουν 3 Π δεσμούς στα μοριακά τροχιακά.



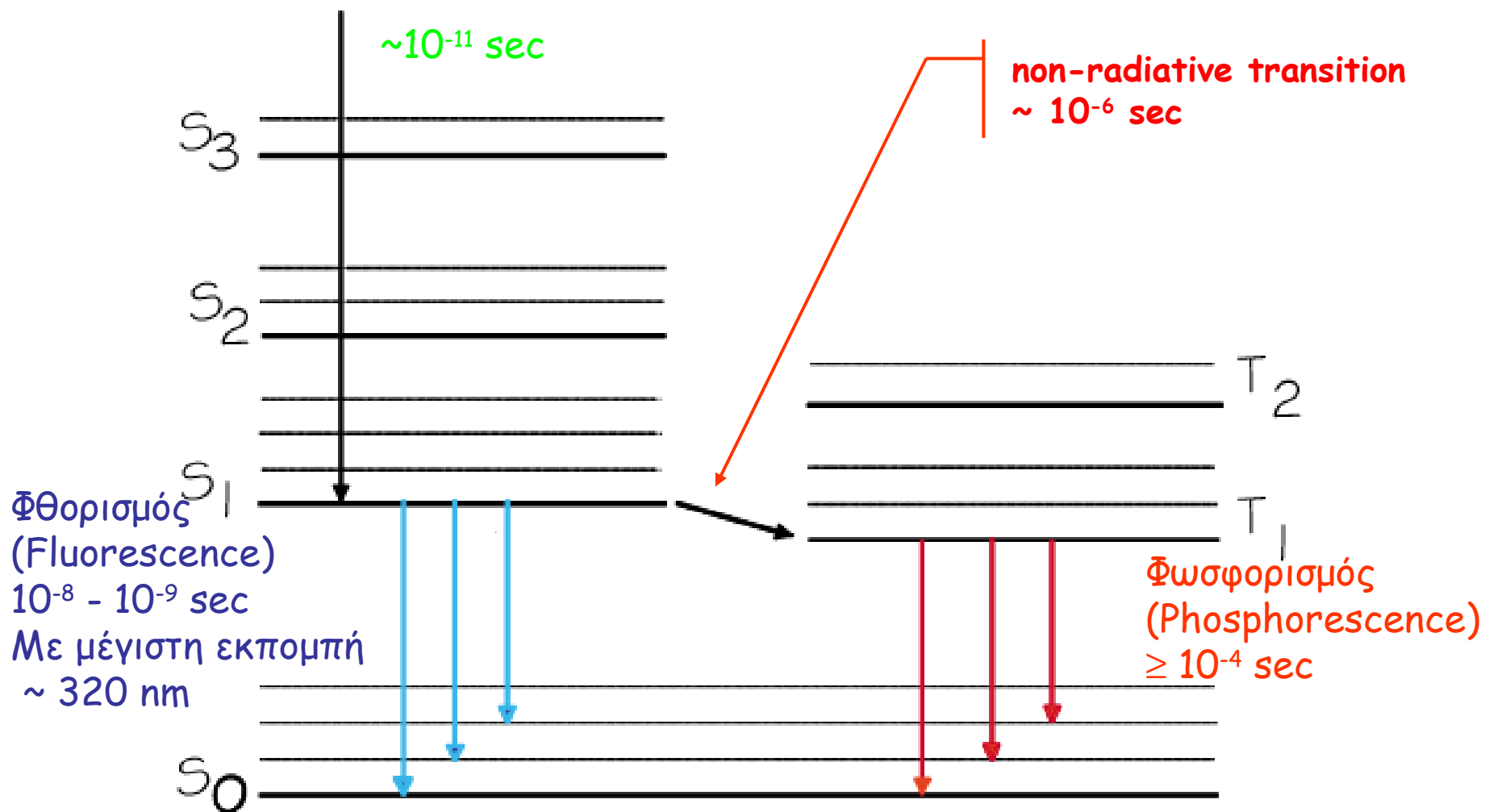
Επιπλέον συνδυάζοντας τις p τροχιές του άνθρακα δίνουν 3 antibonding molecular orbitals.



Τα π ηλεκτρόνια είναι η βάση του σπινθηρισμού. Είναι κβαντισμένα σε singlets S_{ij} και triplets T_{ij}

Οργανικοί Σπινθηριστές

Ενεργειακά επίπεδα των π ηλεκτρονίων



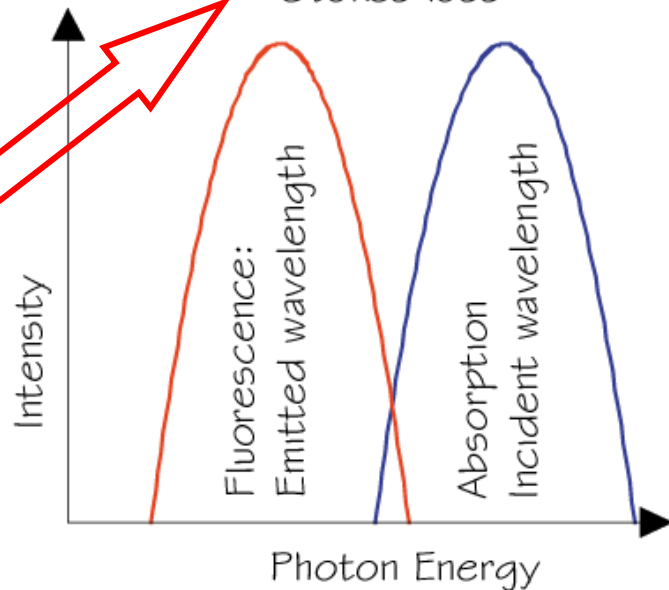
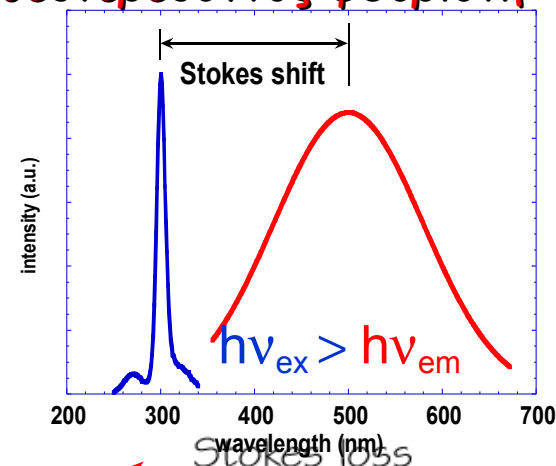
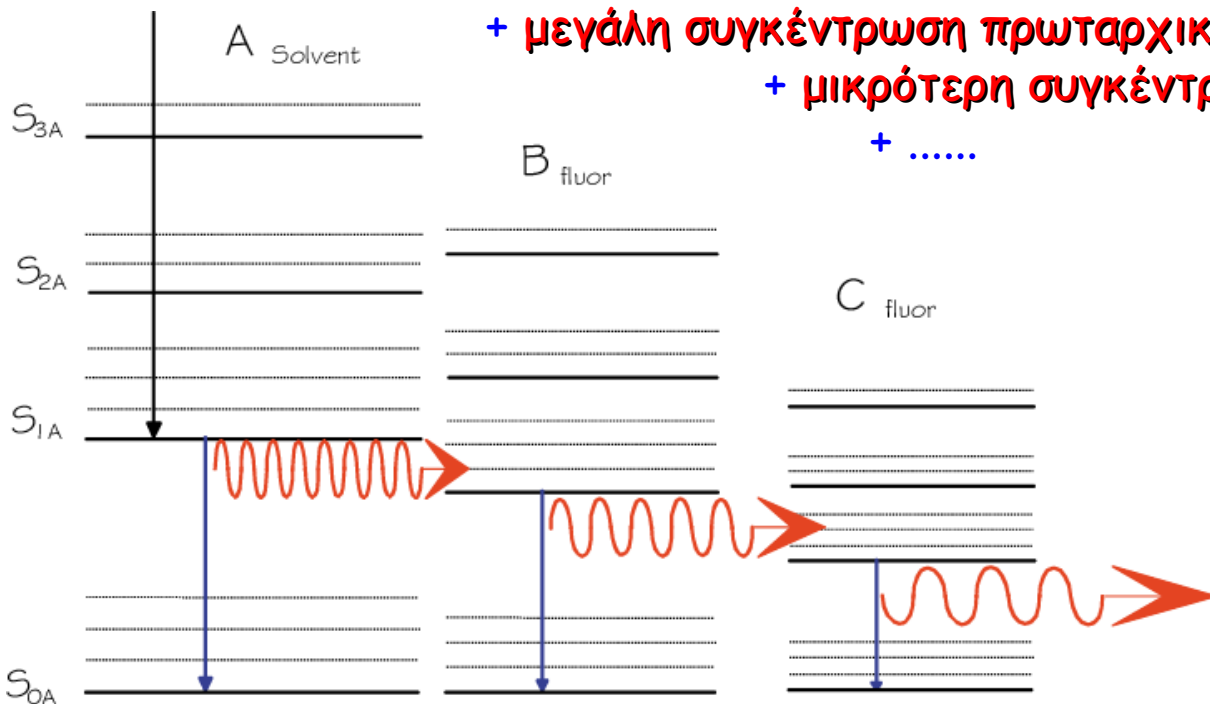
Οργανικοί Σπινθηριστές

Οι οργανικοί σπινθηριστές χρησιμοποιούν
ένα διαλύτη

+ μεγάλη συγκέντρωση πρωταρχικού φοριστή

+ μικρότερη συγκέντρωση δευτερεύοντος φοριστή

+

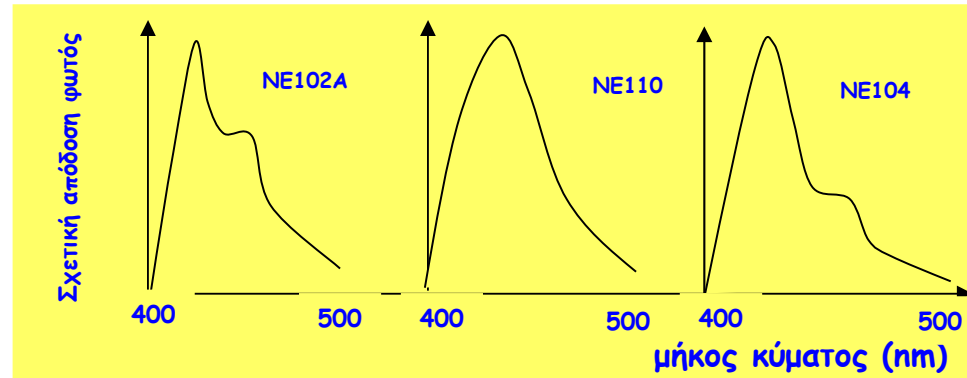


Το μήκος κύματος που εκπέμπεται είναι πάντα μεγαλύτερο ή ίσο με το μήκος του προσπίπτοντος φωτός. Η διαφορά απορροφάται ως θερμότητα από την ατομική δομή του υλικού.

Πλαστικοί Σπινθηριστές

- Οι σπινθηριστές με την πλέον ευρύτατη χρήση στην ΦΥΕ:

- Πολύ-βινυλο-τολουόλιο
- Πολύ-φαινυλο-βενζόλιο
- Πολύ-Στυρένιο



- Ιδιαίτερα ταχείς χρόνοι αποδιέγερσης: **2-5 ns**
- Υψηλή απόδοση φωτός εξόδου με κατανομή:

$$N(t) = N_0 f(t) e^{-t/\tau_d}, \text{ σχέση Bengston-Moszynski}$$

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

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

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

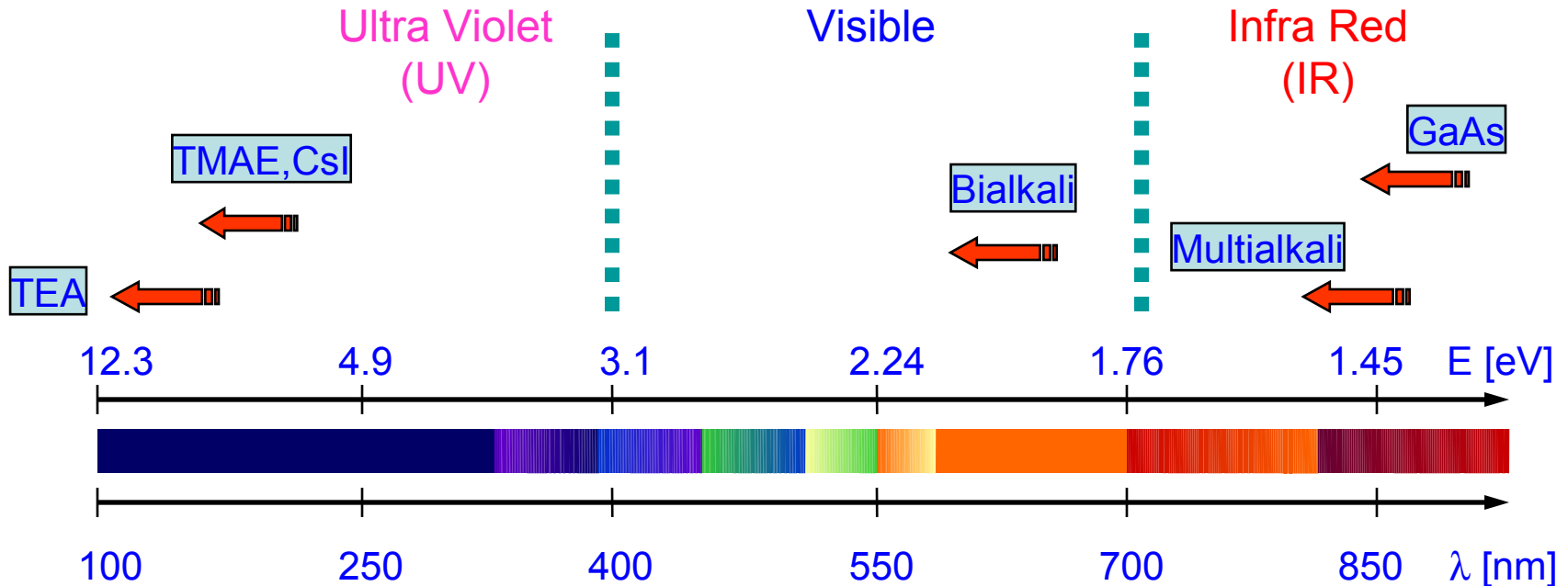
Ευαίσθητοι σε οργανικούς διαλύτες, οξέα, ιδρώτας, κλπ.

Photon Detectors

Κύριοι τύποι photon detectors:

- gas-based
- vacuum-based
- solid-state
- hybrid

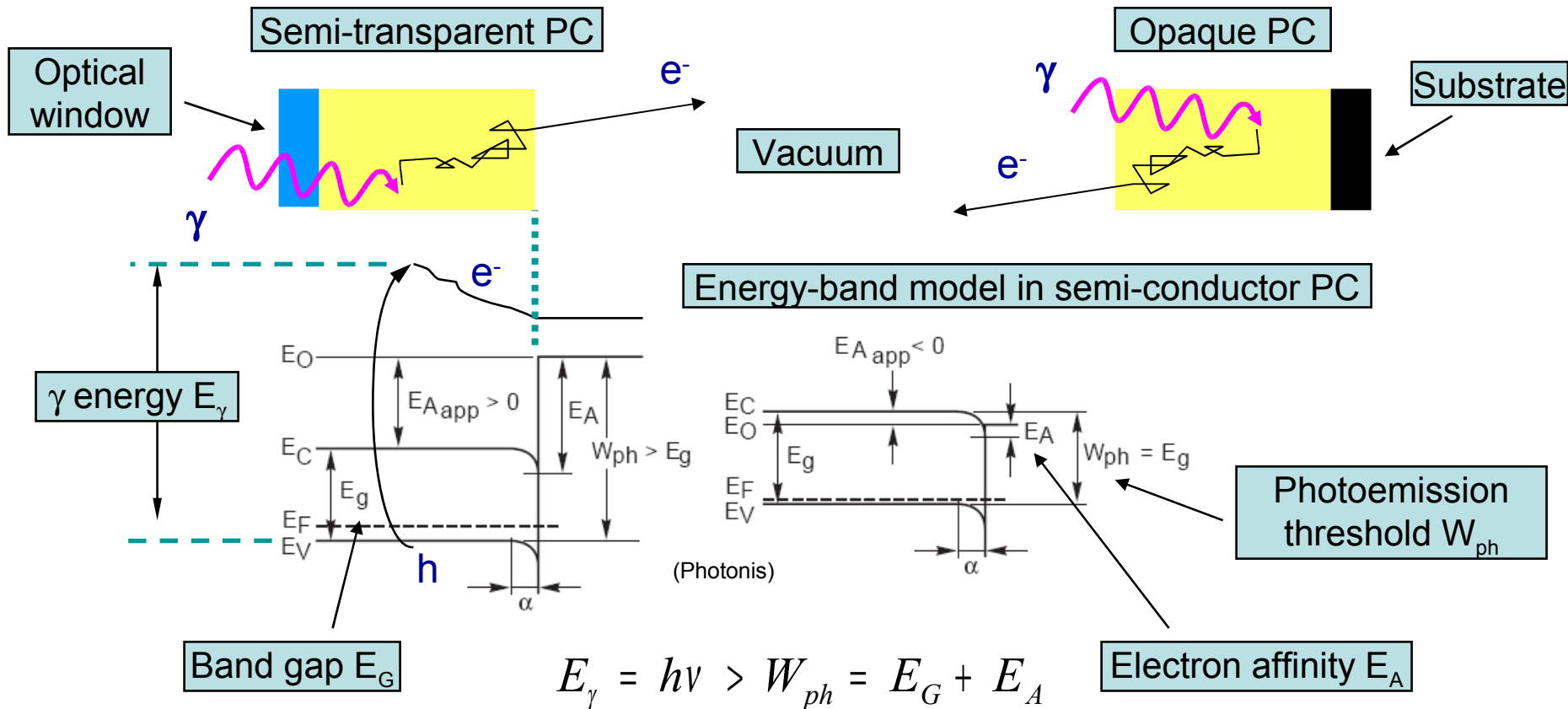
Κατώφλι Photoemission W_{ph} διαφόρων υλικών



Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

Διαδικασία 3-βημάτων:

- Τα απορροφούμενα γ μεταφέρουν ενέργεια στα ηλεκτρόνια (e^-) του υλικού.
 - Ενεργειακά e^- διαχέονται στο υλικό χάνοντας μέρος της ενέργειάς τους.
 - e^- φτάνουν στην επιφάνεια με αρκετή ενέργεια ώστε να ξεφύγουν
- ⇒ Η ιδανική φωτοκάθοδος (PC) πρέπει να απορροφά όλα τα γ και να εκπέμπει όλα τα παραγόμενα e^- .



Quantum Efficiency

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

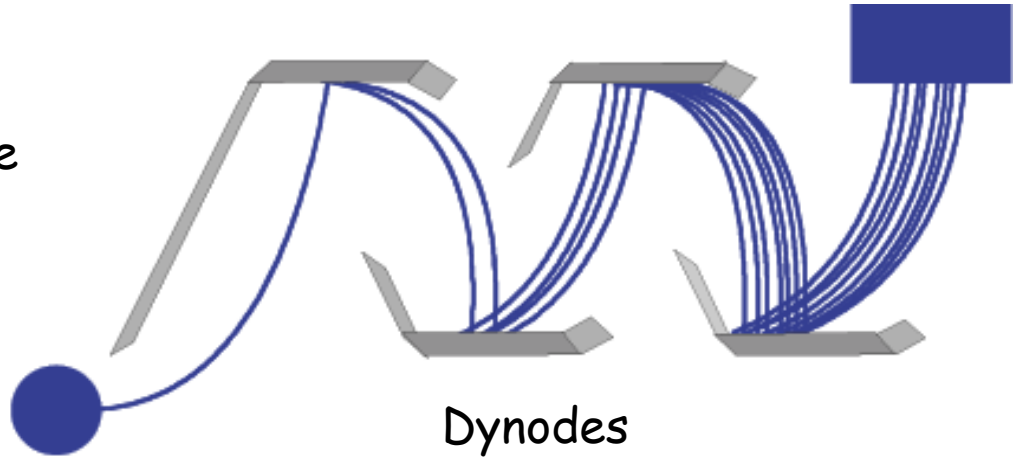
$$\eta(\lambda) = \frac{\text{αριθμός φωτοηλεκτρονίων}}{\text{αριθμός φωτονίων στην κάθοδο}} \%$$

Φωτοπολλαπλασιαστής (PMT)



Photo Cathode

Anode

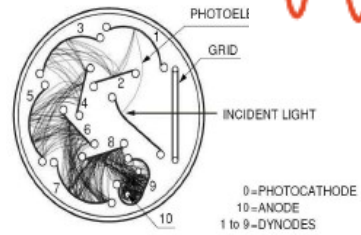


Dynodes

Photon-to-Electron Converting Photo-Cathode

Dynodes με δευτερεύουσα εκπομπή ηλεκτρονίων

Τυπική ενίσχυση $\approx 10^6$. Transient time spread ≈ 200 ps



$$G \propto n$$

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

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

Φωτοπολλαπλασιαστής (PMT)

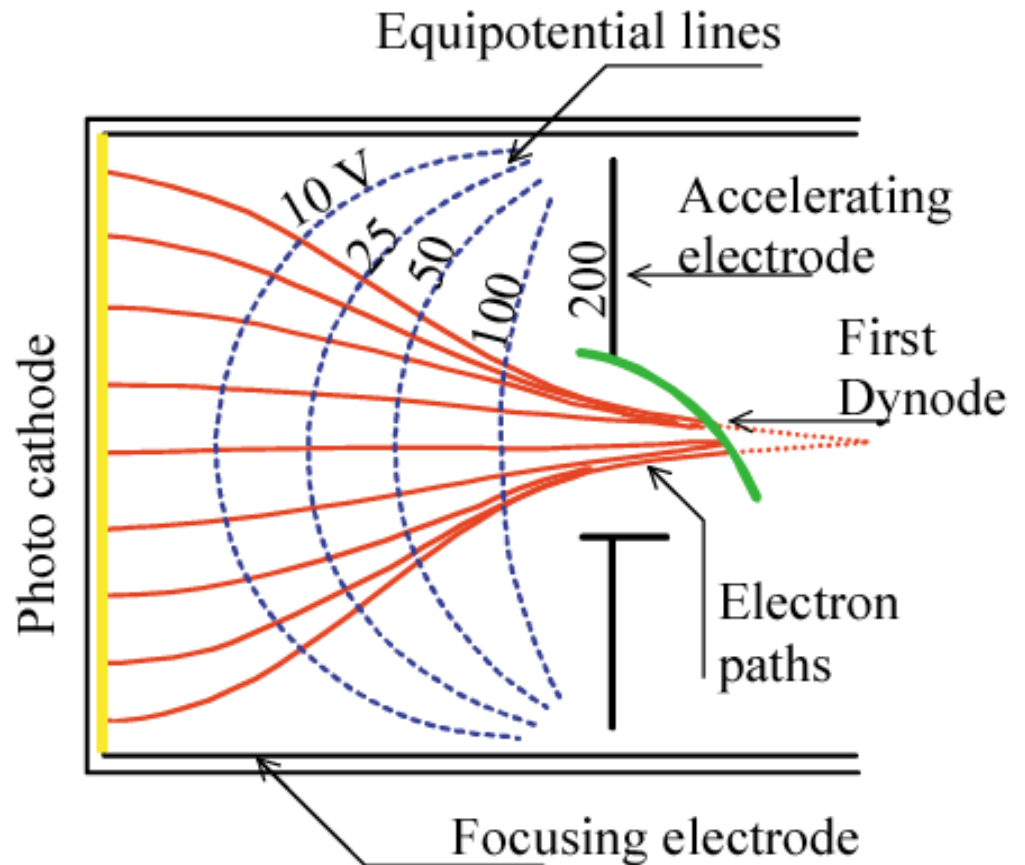
Δευτερεύουσα εκπομπή: σχεδόν το ίδιο με το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Ένα ηλεκτρόνιο προσκρούει → μεταφέρεται ενέργεια στα ηλεκτρόνια του υλικού της δευτερεύουσας εκπομπής έτσι ώστε ένας αριθμός από αυτά να ξεφεύγει. Μονωτές και ημιαγωγοί χρησιμοποιούνται γι' αυτό το σκοπό.

Υλικά που χρησιμοποιούνται είναι:

Ag/Mg, Cu/Be και Cs/Sb.

Επίσης χρησιμοποιούνται ηλεκτραρνητικά υλικά GaP.

Χρόνος πτήσης ηλεκτρονίων από φωτοκάθοδο μέχρι 1^η δύνοδο ανεξάρτητος του σημείου παραγωγής.



Gain fluctuations of PMT's

- Mainly determined by the fluctuations of the number $m(\delta)$ of secondary e^- 's emitted from the dynodes;

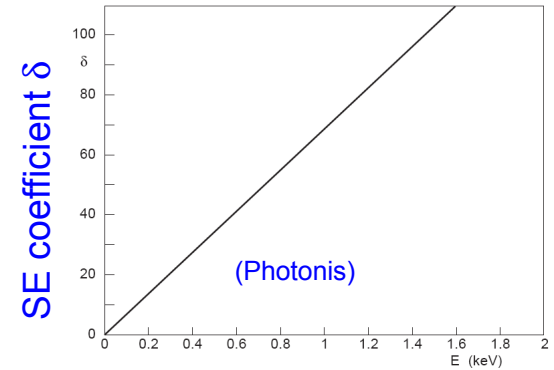
- Poisson distribution:

$$P_{\delta}(m) = \frac{\delta^m e^{-\delta}}{m!}$$

- Standard deviation:

$$\frac{\sigma_m}{\delta} = \frac{\sqrt{\delta}}{\delta} = \frac{1}{\sqrt{\delta}}$$

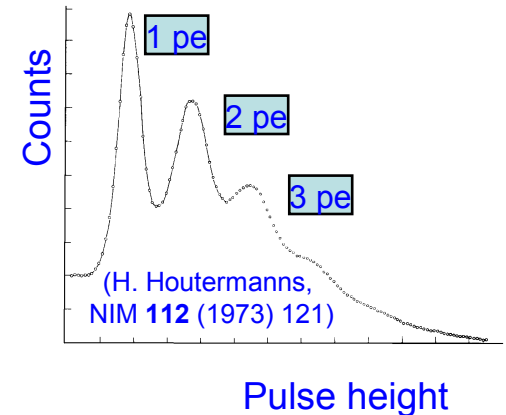
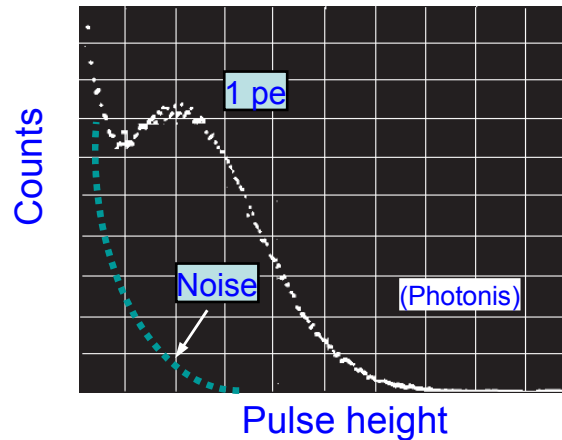
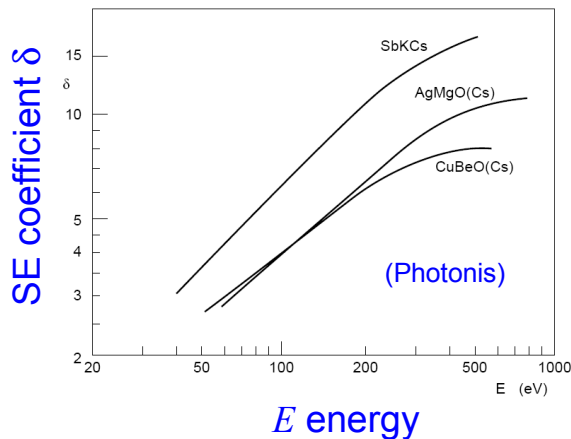
⇒ fluctuations dominated by 1st dynode gain;



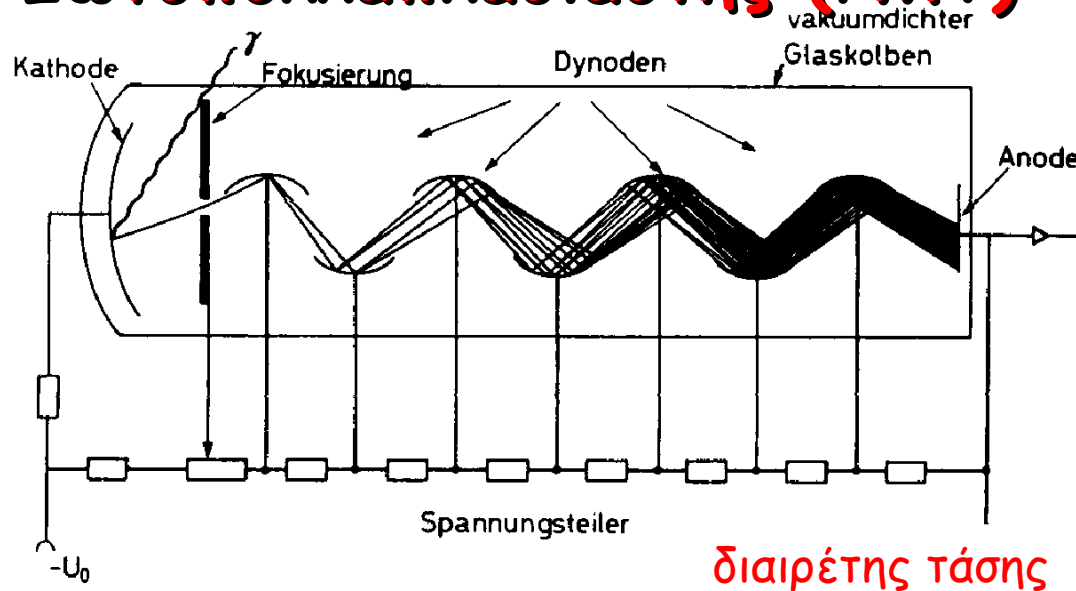
E energy

GaP(Cs) dynodes $E_A < 0$

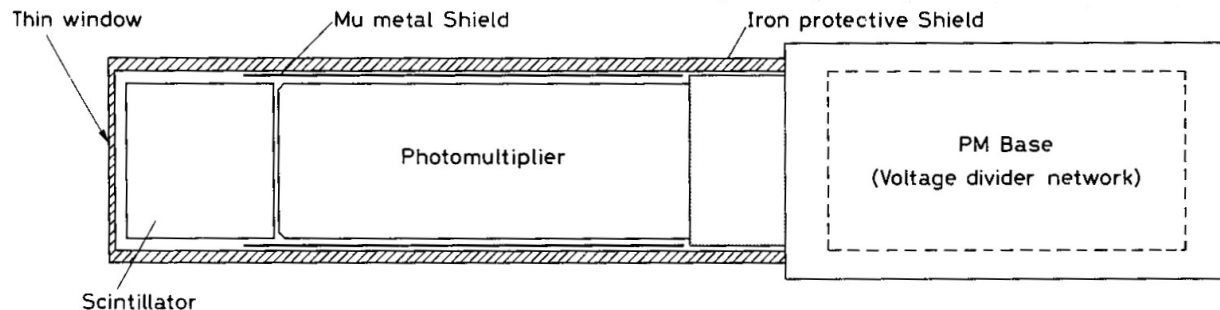
CuBe dynodes $E_A > 0$



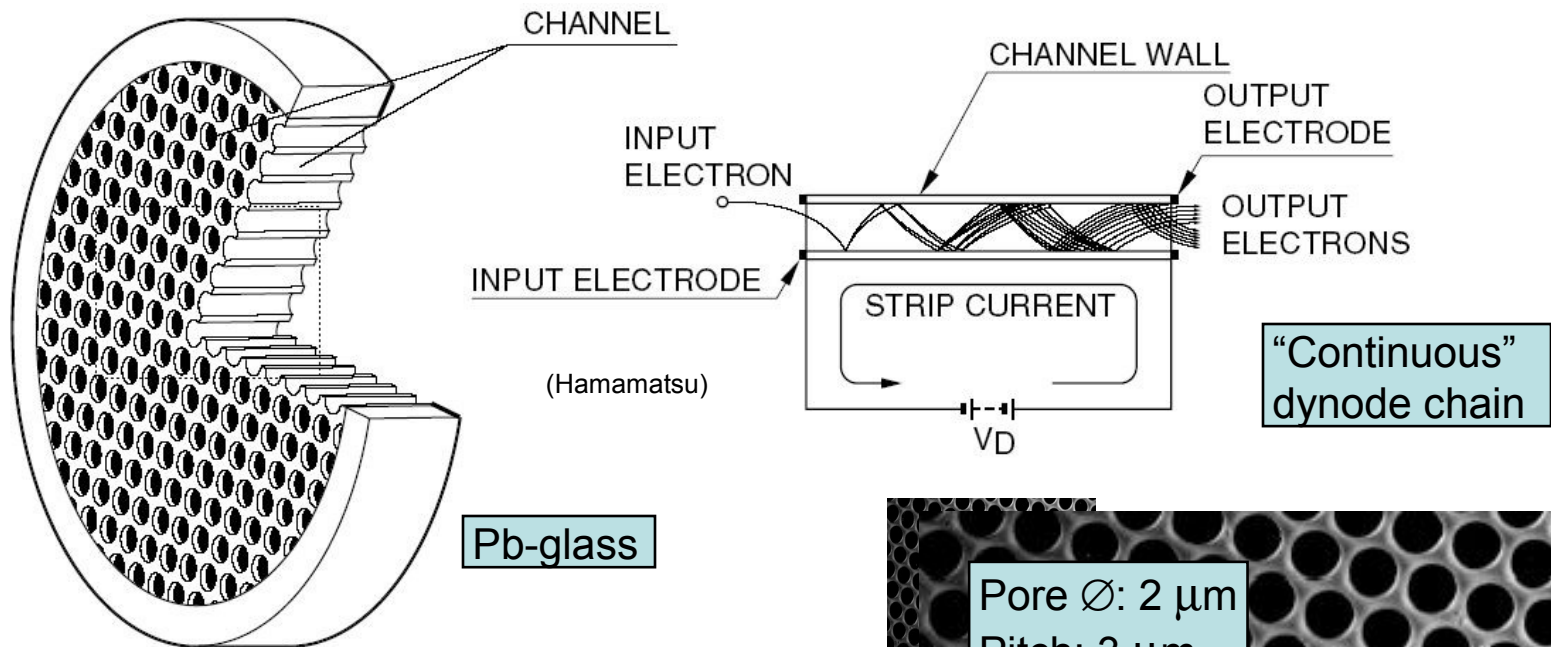
ΦΩΤΟΠΟΛΑΠΛΑΣΙΑΣΤΗΣ (PMT)



- **Απαιτήσεις:** Σταθερότητα τάσης μεταξύ δυνόδων.
Αποφυγή ή απόσβεση διακυμάνσεων τάσης.
- Ελάχιστο μαγνητικό πεδίο αποκλίνει τα ηλεκτρόνια από την τροχιά του → μηδενίζεται το

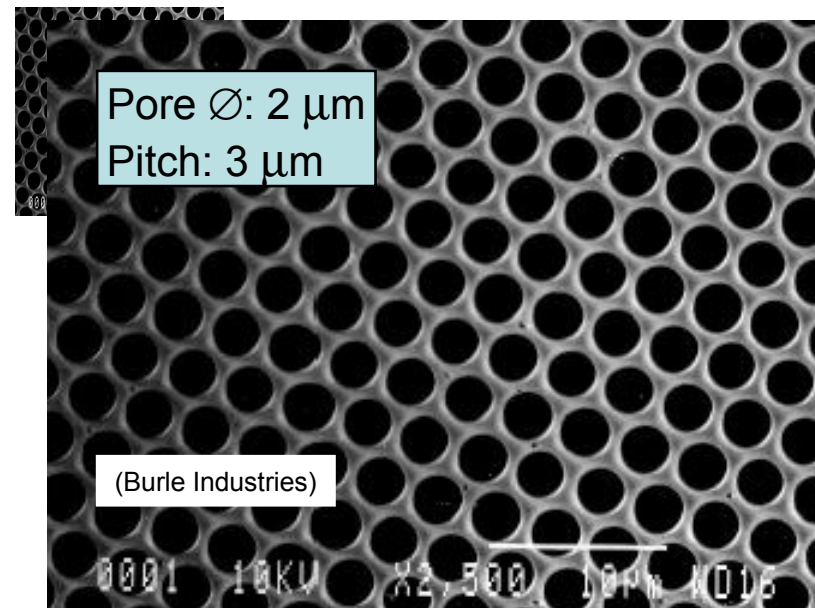


Micro Channel Plate (MCP)



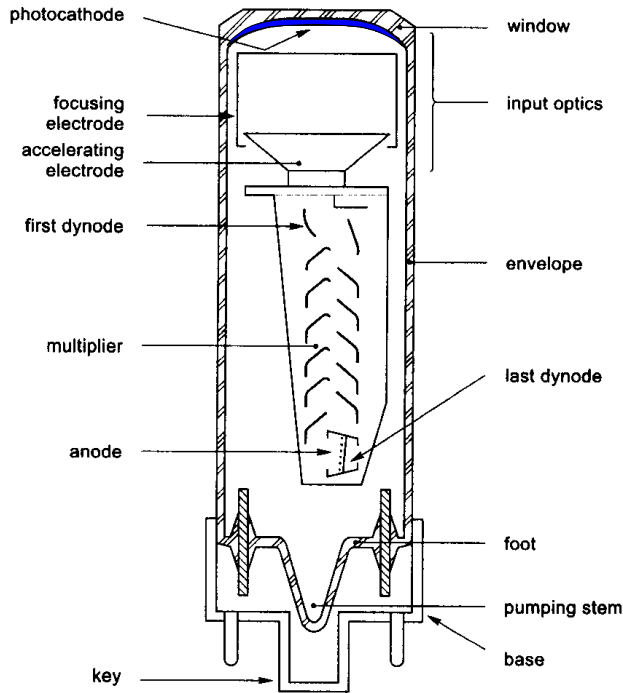
2D PMT:

- + μεγάλη ενίσχυση μέχρι $5 \cdot 10^4$;
- + γρήγορο σήμα (transit time spread ~ 50 ps);
- + λιγότερο ευαίσθητοι σε B-πεδίο (0.1 T);
- Περιορισμένος χρόνος ζωής (0.5 C/cm²);
- Περιορισμένες δυνατότητες σε μεγάλους ρυθμούς ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$);



Hybrid Photo Diodes

Photo Multiplier Tube

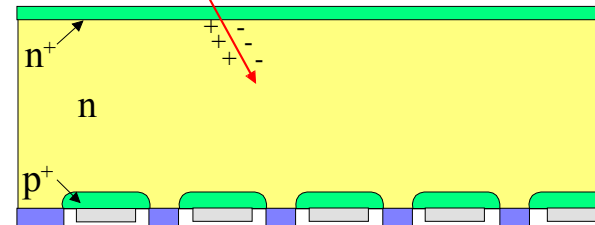


βγάζουμε dynodes και anode

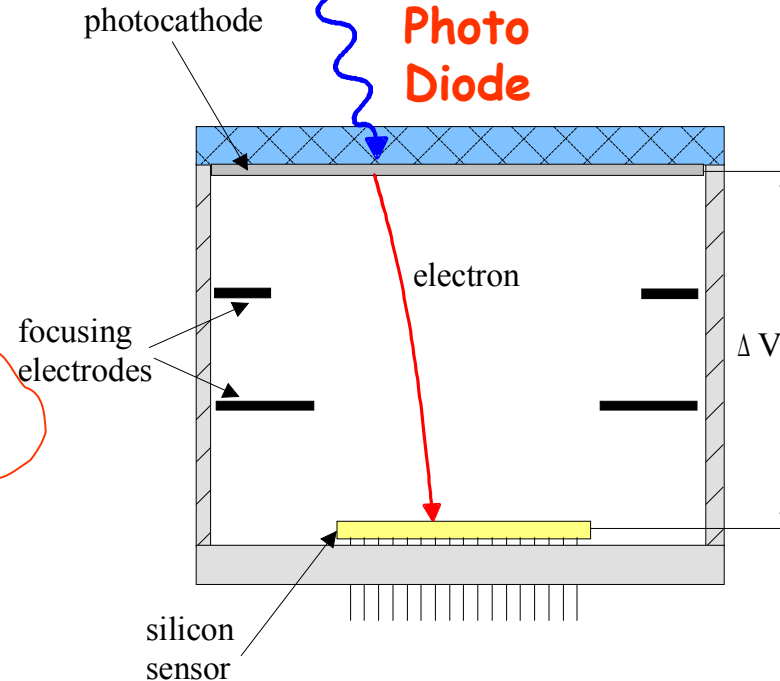
προσθέτουμε

Silicon Sensor

Μέσα στον σωλήνα



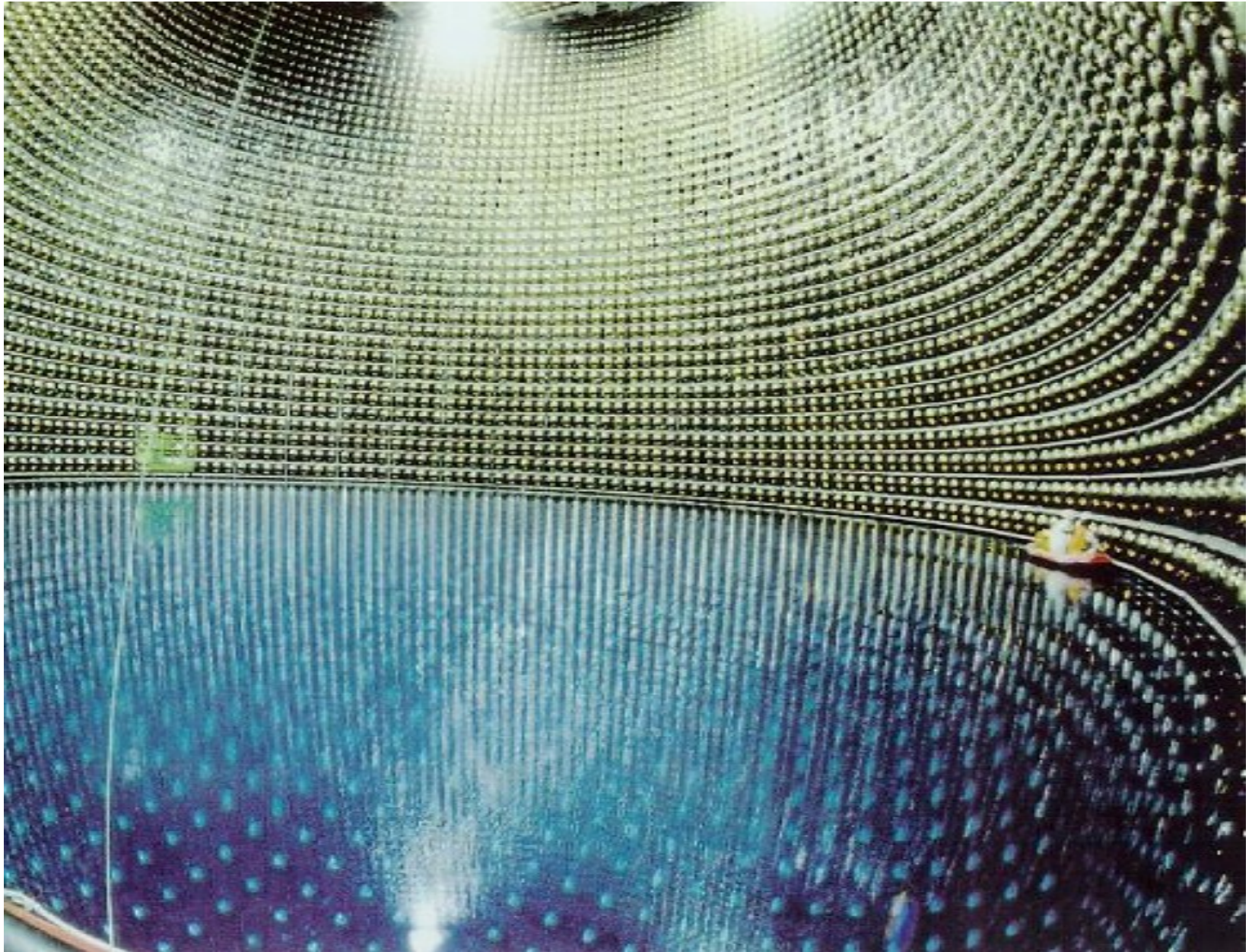
Hybrid Photo Diode



$$\text{Electron-hole pairs} = \frac{[\text{Kinetic energy of the impinging electron}] - [\text{work to overcome the surface}]}{[\text{Silicon ionization energy}]}$$

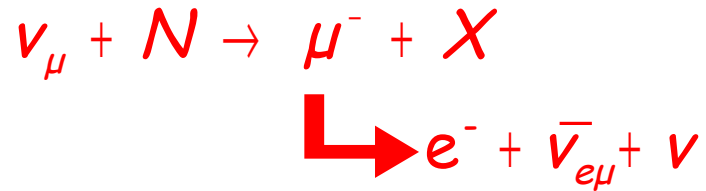
~ 4 - 5000 electron-hole pairs → Καλή ενεργειακή διακριτική ικανότητα

Water Cherenkov



Water Cherenkov

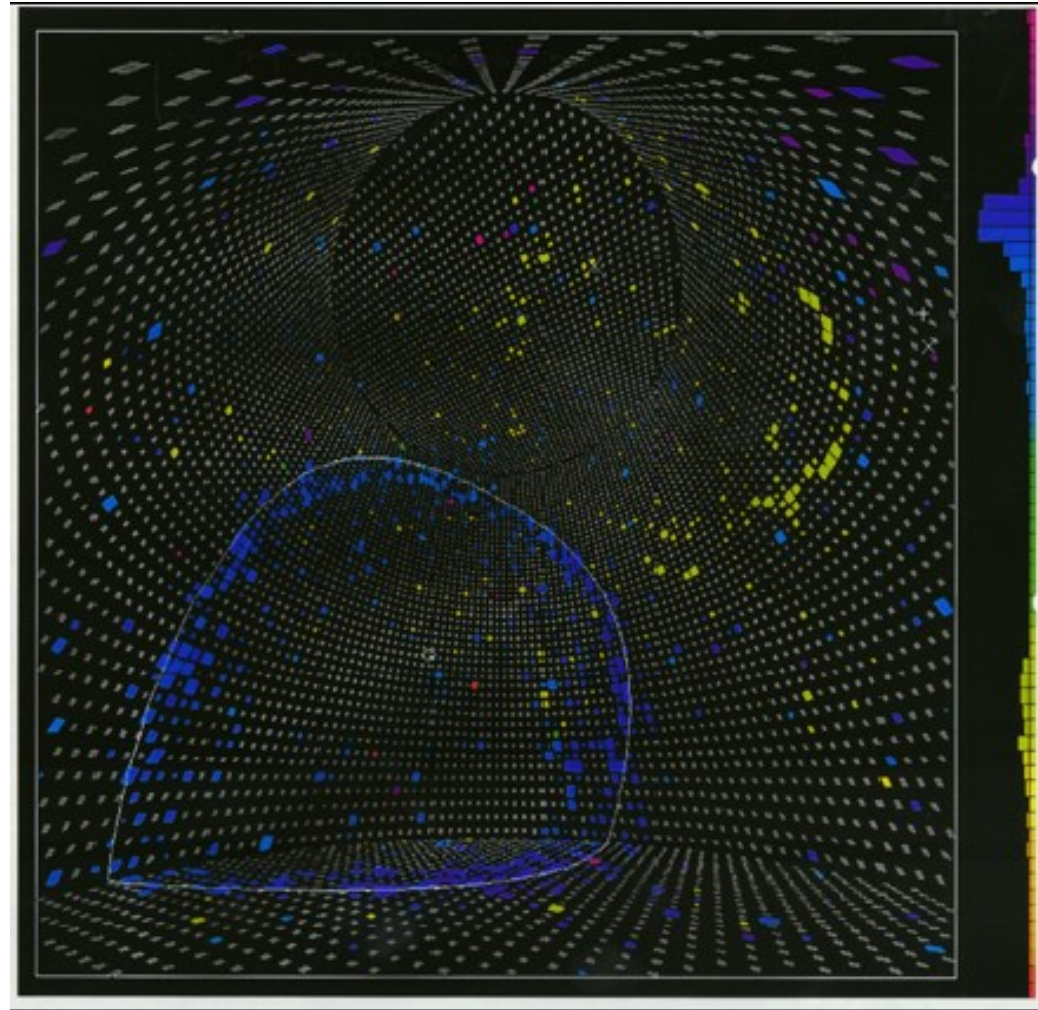
- Γεγονός μ' ένα μίονιο που σταματά
Superkamiokande



$$E_{\nu_{\mu}} = 481 \text{ MeV}$$

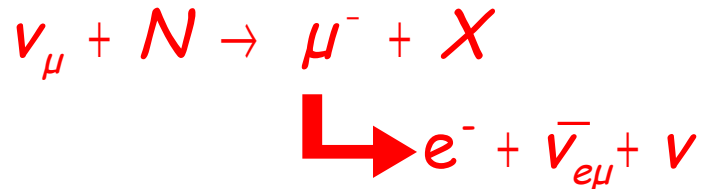
$$E_{\mu} = 394 \text{ MeV}$$

$$E_e = 52 \text{ MeV}$$



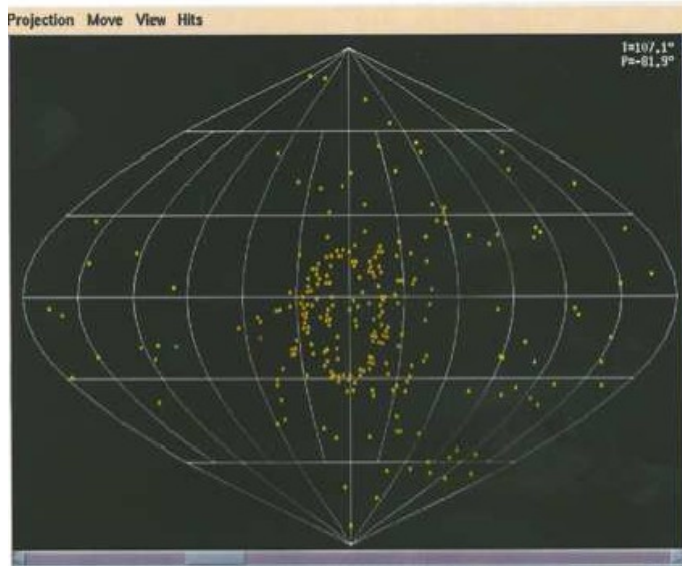
Water Cherenkov

- Γεγονός μ' ένα μίονιο που σταματά
SNO -Sudbury Neutrino Observatory



- Δύο εικόνες που τραβήχτηκαν

με διαφορά
 $\Delta t = 0.9 \mu\text{s}$



GTID: 56982
Evt Num: 57072
Run Num: 3510
Date: 05/16/1999
Time: 06:19:22.1867780
Trigger: 100H,100M,100L

