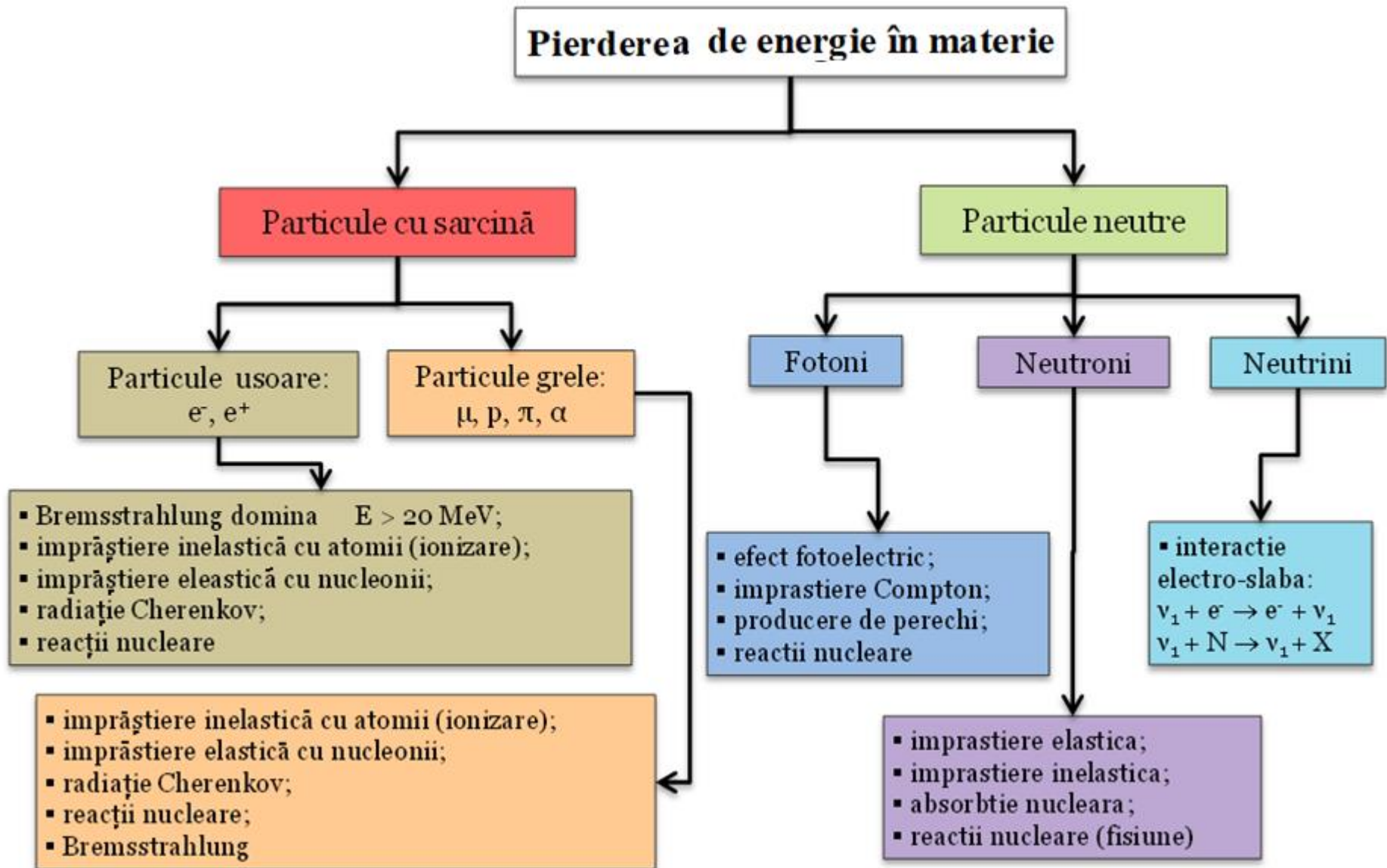


Noțiuni de fizica detectorilor

- Fundamentul fizic a funcționării detectorilor, constă în mecanismul de interacțiune a radiațiilor nucleare cu materia.
- Procesul fundamental al interacțiunii radiațiilor nucleare cu materia - energia implicată în procesul de interacțiune este mai mare decât energia de legătură a electronilor din atom și poate genera schimbări sau transformări în structura atomilor componenți ai substanței.
- Mecanismele de interacțiune a radiațiilor nucleare cu materia care stau la baza detecției acestora: **ionizarea** și **emisia/conversia luminii**

Mecanismul de interacțiune	Tip de detector	Mediul	Nr.electroni/fotoni liberi per cm
Ionizare	Gazoși	gaze nobile, hidrocarburi	< 10
	Solizi	siliciu, germaniu	< 10
	Camere cu bule	hidrogen lichid	urme de bule
Emisie/conversie de lumină	Scintilatori	sticlă, plastic	$\sim 10^2$
	Fotomultiplicatori	cadmiu, pamânturi rare	$\sim 10^3$
	Detectori Cerenkov	gaz, plastic	$\sim 10^2$

- **Pierderea de energie** reprezintă una dintre cele mai importante caracteristici ale interacției radiației cu materia



Parametrii unui detector de radiații

- *Sensibilitatea* - numărul minim de cuante/particule detectate pentru un anumit câmp de radiație (capacitatea acestuia de a detecta și măsura radiațiile de interes în prezența zgomotelor și a semnalelor cauzate de alte radiații).
- *Rezoluție energetică* - precizia cu care detectorul poate măsura energia radiației și capacitatea de discernere între diferite tipuri de radiații observate, pentru un fascicul monoenergetic dat.
- *Funcția de răspuns* - relația dintre energia inițială a cuantei/particulei și intensitatea impulsului de ieșire. Dacă înălțimea impulsului sau aria acestuia crește liniar cu energia depozitată în materialul detectorului - *detectori spectrometrici*. Dacă dau același impuls pentru oricare particulă detectată avem *numărători*.
- *Eficiența* - fracțiunea de radiații din numărul incident, care este înregistrată de detector. Această caracteristică are două componente: *eficiența intrinsecă* (fracțiune de particule/cuante care interacționează cu volumul detectorului și este detectată) și *eficiența geometrică* (unghiul solid sub care este observată sursa)
- *Timpul de răspuns* - durata după care detectorul generează un impuls în urma interacțiunii unei cuante de radiație cu materialul sensibil al acestuia.
- *Timpul mort* - intervalul de timp dintre înregistrarea a două cuante/particule (timpul în care detectorul nu înregistrează). Această caracteristică este dată printr-o valoare medie.

Ionizare			Scintilație		
Tip detector	G-M	Proportional	Semicon.	NaI:Tl	Plastic
Răspuns	fixat	liniar	liniar	liniar	liniar
Rezoluție	nu	10-15%	0.2-0.3%	5-10%	15-20%
Timp de răspuns	100μs	30-50ns	100ns	100ns	1-2ns
Timp mort	300μs	100ns	1-10μs	1μs	10ns
Eficiență α, β	>90%	>90%	~100%	~100%	~100%
MeV γ	1-2%	1-2%	20-80%	30-100%	5-15%
keV γ	~10%	~10%	100%	joasă	joasă

Detectori de ionizare

detectori cu gaz

detectori solizi (cu semiconductori)

➤ Proces de generare de sarcini (ioni pozitivi și negativi, electroni și goluri)

✓ sarcină electrică generată

$$\Delta Q = 1.60 \times 10^{-19} E_p \eta w^{-1}$$

E_p -energia totală pierdută în detector

η -eficacitatea de colectare

w -energia formării unei perechi de sarcină

(depinde de tipul și natura materialului detectorului)

✓ curentul generat - puls de sarcină

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

✓ printr-o rezistență (rezistență de sarcină) - produce un puls de tensiune

$$\Delta V = R \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

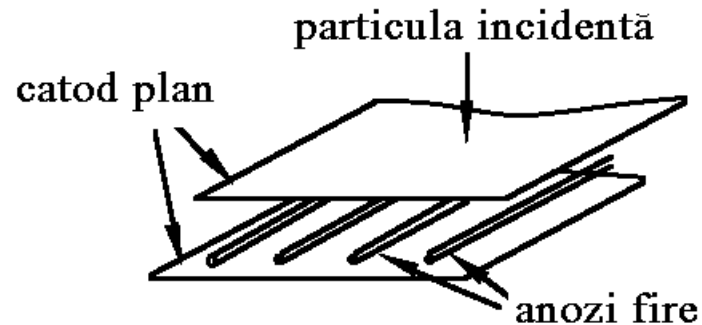
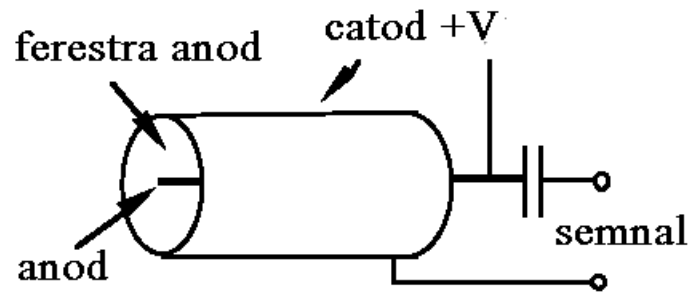
✓ constituie un semnal pentru preamplificator

- **Detectori cu gaz** - generare de perechi de ioni - energia efectivă de formare a unei perechi de ioni ► 35.5 eV
- Mișcarea electronilor liberi și a ionilor din gaz sub influența unui câmp electric (E) [**viteza de drift** (v)], induce pe electrozii detectorului, un semnal de curent electric.

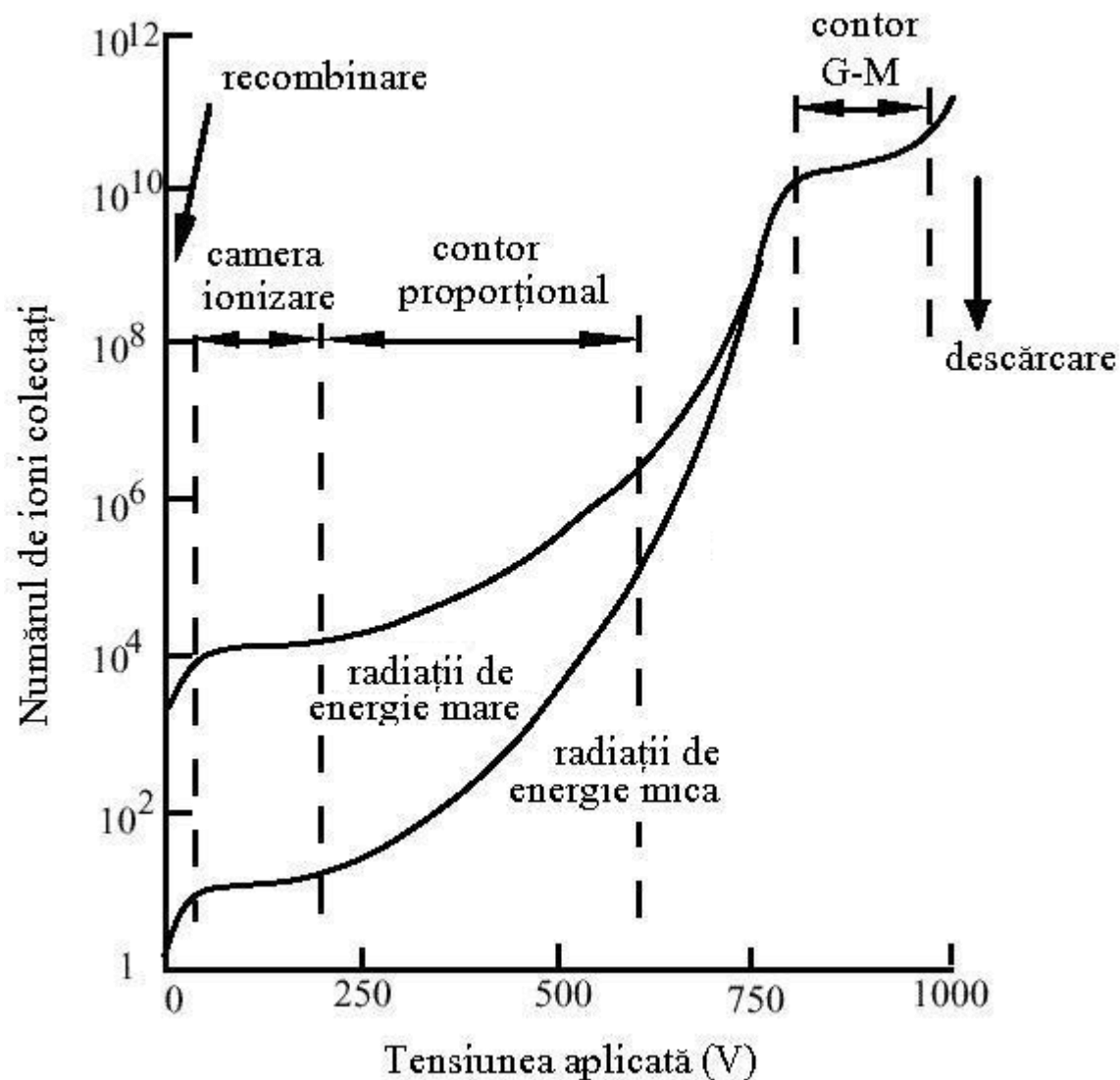
$$v = \frac{q_e}{m} \frac{1}{p} E = \mu \frac{E}{p}$$

μ - mobilitatea electronilor la presiune (p) dată

- Ionii formați, se vor deplasa către anod (ionii negativi) respectiv către catod (ionii pozitivi), conducând la formarea unor pulsuri de sarcină.

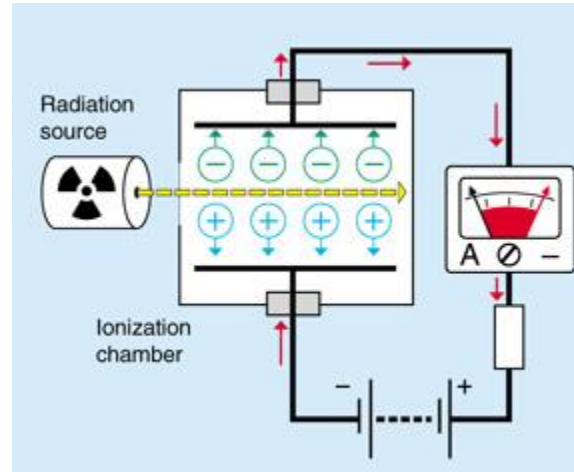
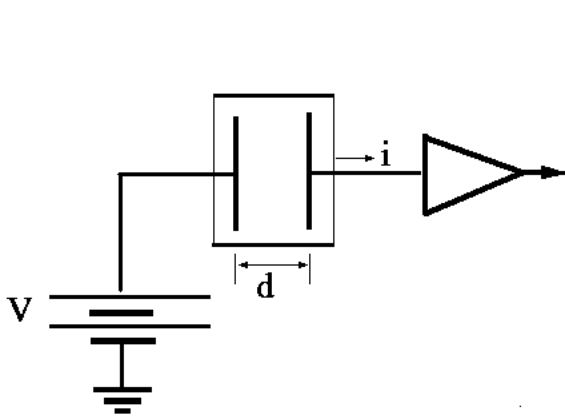


- Colectarea sarcinilor generate într-un detector cu gaz, este puternic dependentă de câmpul electric (tensiunea) aplicat



Camera de ionizare

- Incintă umplută cu gaz în care se găsesc doi electrozi



- Tensiune continuă cu valori cuprinsă între 100-500 V
- condensator de capacitate C , care stochează o sarcină: $Q=C \cdot V$

- Energia stocată
$$W = C \frac{V^2}{2} = \frac{Q^2}{2C}$$

- Curentul colectat

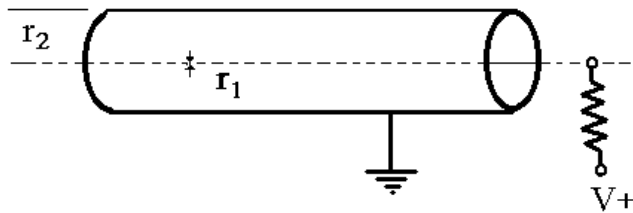
$$i = \frac{q_0 V}{d^2 \cdot P} (\mu_+ + \mu_-)$$

- ✓ *Intensitatea curentului - invers proporțional de pătratul distanței dintre electrozi și de presiunea gazului - colectarea sarcinii se face prin integrare sau adunare iar curentul total este măsurat în funcție de timp*

Contorul proporțional

- Tensiune aplicată mai mare (300-600 V) - multiplicare a sarcinilor – $M = \exp(\alpha \cdot r)$
 α - “coeficient Townsend” - depinde de natura gazului și de energia ionilor
- pentru un raport E/p dat, depinde liniar de presiune

$$\alpha = f\left(\frac{E}{p}\right) \cdot p$$

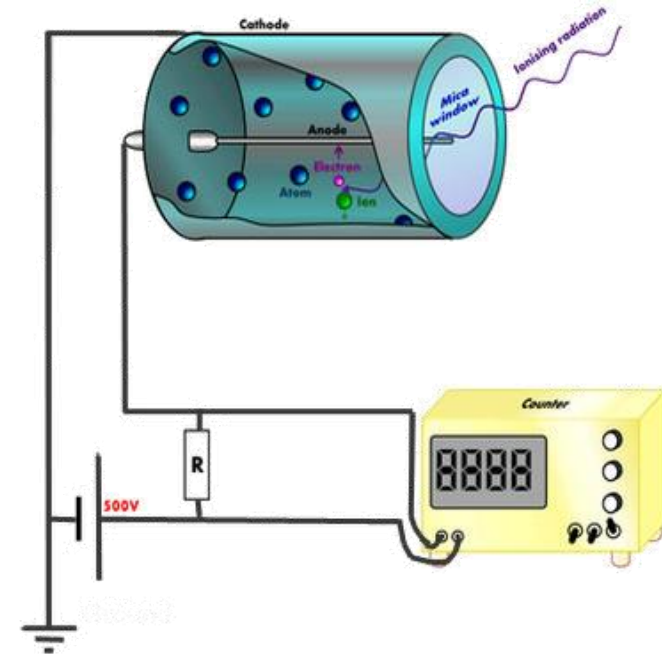


- semnalul este obținut prin colectarea sarcinilor ionilor pozitivi.

$$i = \frac{q_0}{V \cdot P} (E_+^2 \mu_+ + E_-^2 \mu_-) = \frac{q_0}{V \cdot P} E_+^2 \mu_+$$

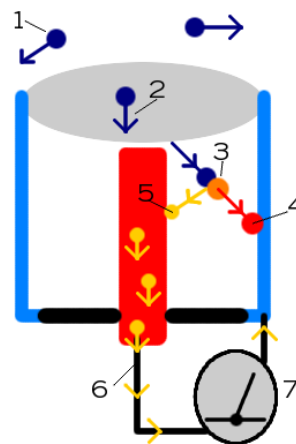
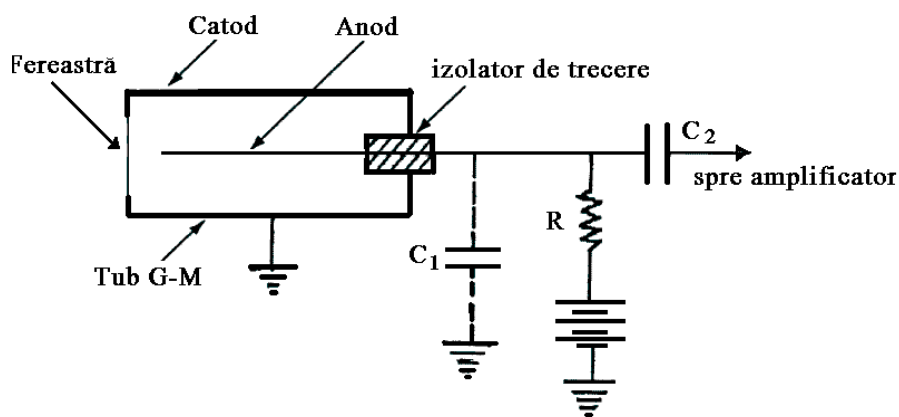
- sarcina totală colectată în unitatea de timp

$$Q(t) = \int_0^t \frac{q_0 \mu_+ V}{p \left(\ln \frac{r_2}{r_1} \right)^2} \frac{dt'}{r_1^2 + \frac{2\mu_+ V}{p \ln \frac{r_2}{r_1}}} = \frac{q_0}{2 \ln \frac{r_2}{r_1}} \ln \left(1 + \frac{2\mu_+ V}{r_1^2 p \ln \frac{r_2}{r_1}} t \right)$$



Contorul Geiger- Müller

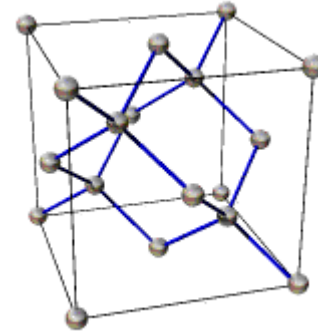
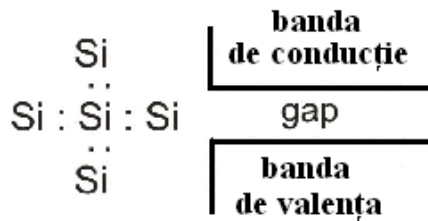
- Regimul de funcționare - zona superioară a contorilor proporționali



- Gazul constituent al tuburilor Geiger-Müller - un **gaz nobil** cu potențial de ionizare mare (în special, argon sau heliu), aflat la presiune mai joasă decât presiunea atmosferică
 - ✓ “*gaze de stingere*” (molecule organice -alcooli) - stoparea efectului Tanwsend prin absorbția radiațiilor X caracteristice produse în procesul de ciocnire a ionilor pozitivi cu peretele catodului și previne generarea de noi ionizări ca urmare a împrăștierei ionilor pozitivi pe pereții catodului.

Detectorii cu semiconductori

- **Semiconductorii** - materiale cu rezistivitatea cuprinsă între cea a conductorilor (de exemplu cupru $10^{-8} \Omega\text{m}$) și cea a izolatorilor (rezistivitatea cuarțului: $10^{12} \Omega\text{m}$). Valorile tipice ale acestora sunt de $10^3 \Omega\text{m}$ pentru siliciu și de $0.6 \Omega\text{m}$ pentru germaniu

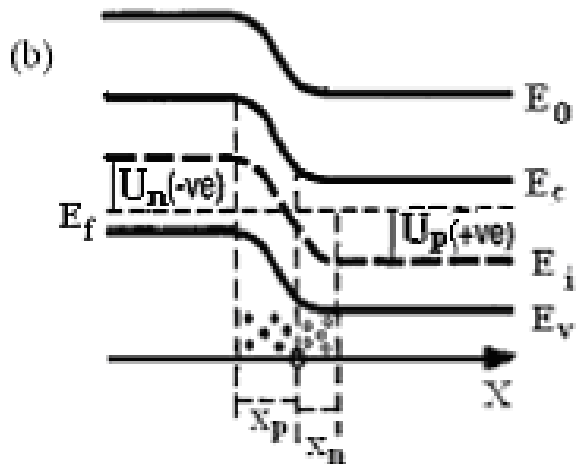
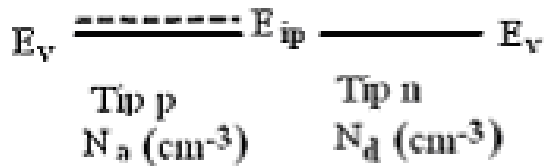


- ✓ **Donor de tip n** - atom pentavalent (de exemplu fosforul) - formează patru legături rămânând un electron slab legat plasat pe un nivel energetic aproape de banda de valență
 - ✓ **Acceptor tip p** - atom trivalent (de exemplu borul) - o legătură rămâne nesatisfăcută, obținându-se un gol (impuritate de tip **p**) anihilată de un electron
- Unirea suprafețelor celor două tipuri de structuri se obține o **joncțiune $p-n$**

➤ Nivele energetice în semiconductori de tip *n* și *p*



(a) separați



(b) în contact (joncțiune)

➤ Gradul de ocupare a nivelelor energetice - este dat de distribuția Fermi-Dirac

$$f_D(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$$

E_F - nivelul Fermi

- **Rezistivitatea ρ** - depinde de concentrația electronilor liberi (n_n) și a golurilor (n_p) și de mobilitatea μ acestora

$$\rho = \frac{1}{e(n_n \mu_n + n_p \mu_p)}$$

$$n_n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_f}{kT}\right)$$

$$n_p = N_V \exp\left(-\frac{E_f - E_C}{kT}\right)$$

$N_{C,V}$ și $E_{C,V}$ -densitățile de stări și energiile din banda de conducție și valență

- grosimea barierei depinde de rezistivitate, tensiunea aplicată și mobilitatea purtătorilor de sarcină, μ

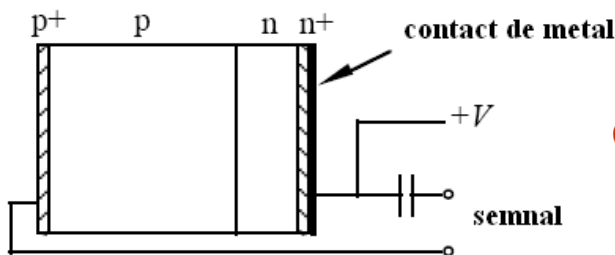
$$d = (2 \varepsilon_s V \rho \mu)^{\frac{1}{2}}$$

- Interacțiunea unei radiații nucleare cu semiconductorul, generează electroni în banda de conducție și goluri în banda de valență care vor fi colectați și transformați în semnal, ca urmare a scăderii rezistivității joncțiunii.

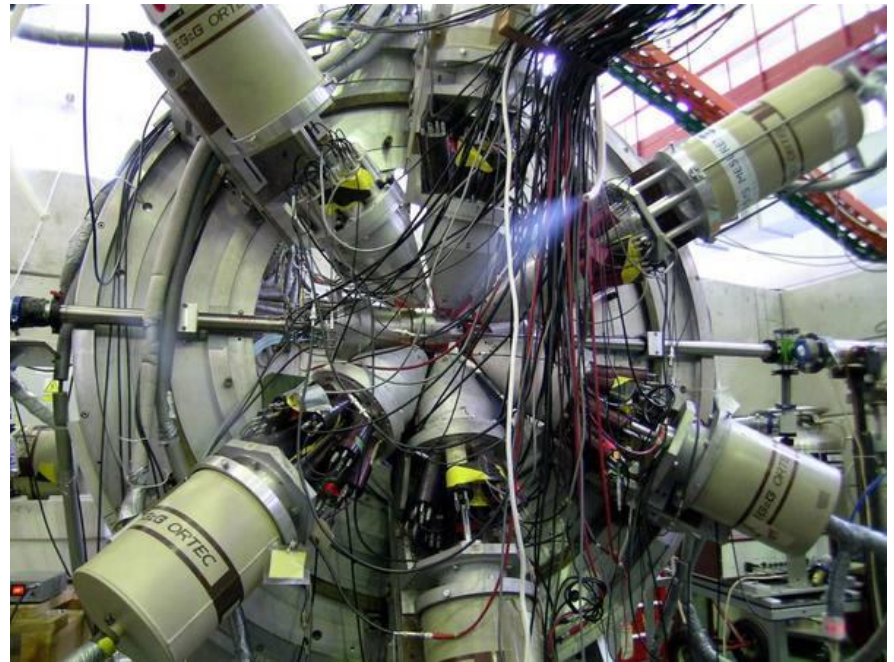
- În funcție de numărul de perechi de sarcină formate (care sunt dependente de energia radiației), avem intensități diferite ale impulsurilor înregistrate. Identificarea tipului de particule se face conform relației Bethe (pierderea de energie)

$$-\frac{dE}{dx} E = \text{const.} \times M Z^2$$

- Două tipuri de materiale semiconductoare: Siliciu și Germaniu:
 - ✓ **Barieră de suprafață (SSB)** - monocristale subțiri din siliciu pur de tip *n* cu rezistivitate mare ($10^3 \Omega \text{cm}$), pe fețele cărora sunt depuse două contacte de aur și aluminiu
 - ✓ **Diode PIN** - suprapunerea a trei straturi semiconductoare, respectiv tip *p*, intrinsec *i* și tip *n* (*PIN*).
 - ✓ **Detectori Si(Li)** – prin driftarea atomilor de litiu în structura cristalină a semiconductorului de tip *p*, atomii de litiu cedează un electron în banda de conducție și devin ioni. Detectori pe bază de drift de atomi de litiu sunt de tip **Si(Li)** și **Ge(Li)**.
 - ✓ **purități înalte** - (detectori *hyper-puri* tip *HPGe* sau *HPSi*) nu necesită răcire permanentă.

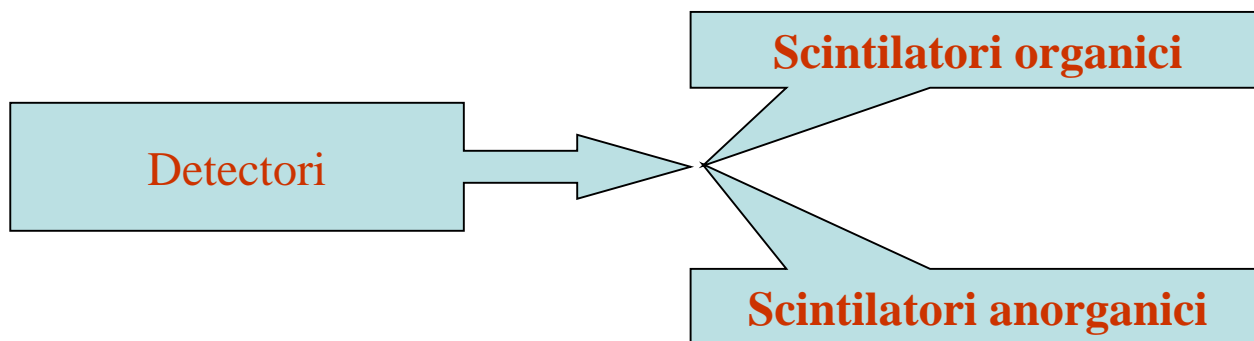


Geometria tipică a unui detector cu semiconductor



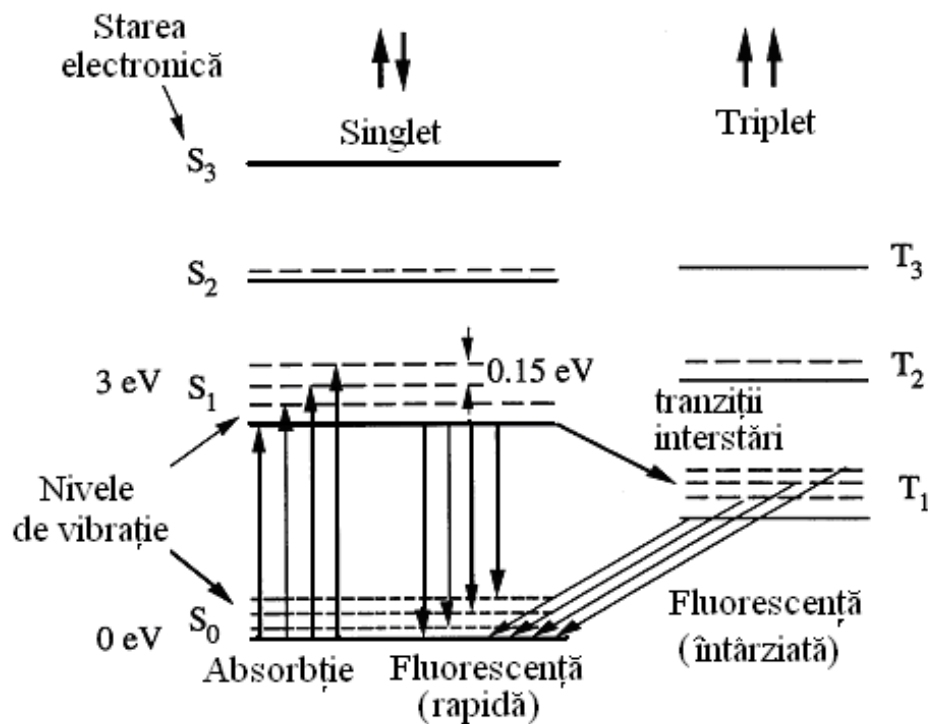
Detectori cu scintilație

- **Fundamentul detectorilor cu scintilație** - fenomenul de generare de lumină vizibilă sau ultravioletă (scintilație) ca urmare a ineracțiunii radiației ionizante cu unele substanțe
- **Procesul** constă în tranzițiile dintre stările excitate a nivelelor electronice aflate în starea fundamentală
- **Materialele scintilatoare** - substanțe *organice* sau *anorganice* aflate în stare *solidă*, *lichidă* sau *gazoasă*



Scintilatori organici

- Nivelele de interes sunt cele ale moleculelor individuale



- În funcție de nivele între care are loc tranziția

▶ fluorescență – $S_{01} \rightarrow S_{0n}$

▶ fosforescență – $T_{01} \rightarrow S_{0n}$

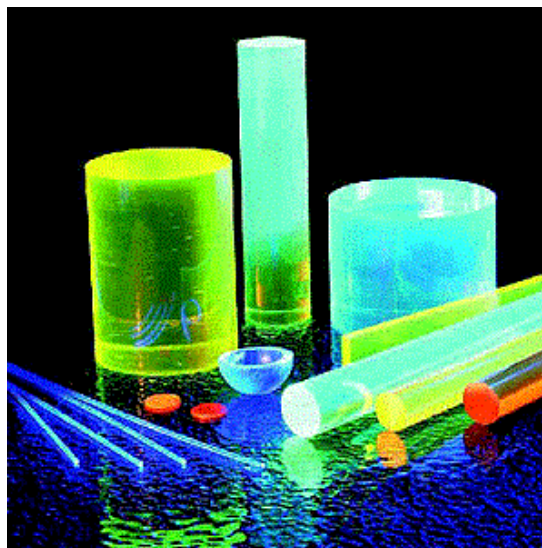
▶ fluorescență întârziată - $S_{1n} \rightarrow T_{1n}$

Caracteristici ale scintilatorilor organici

Material	Densitatea (g/cm ²)	λ_{max} (nm)	Constanta de dezexcitare (ns)	Intensitatea relativă
Antracen	1.25	440	32	100
Stilben	1.16	410	6	60
Plastic	1.06	350-450	3-5	28-48
Lichid	0.86	355-450	2-8	27-49



Organic



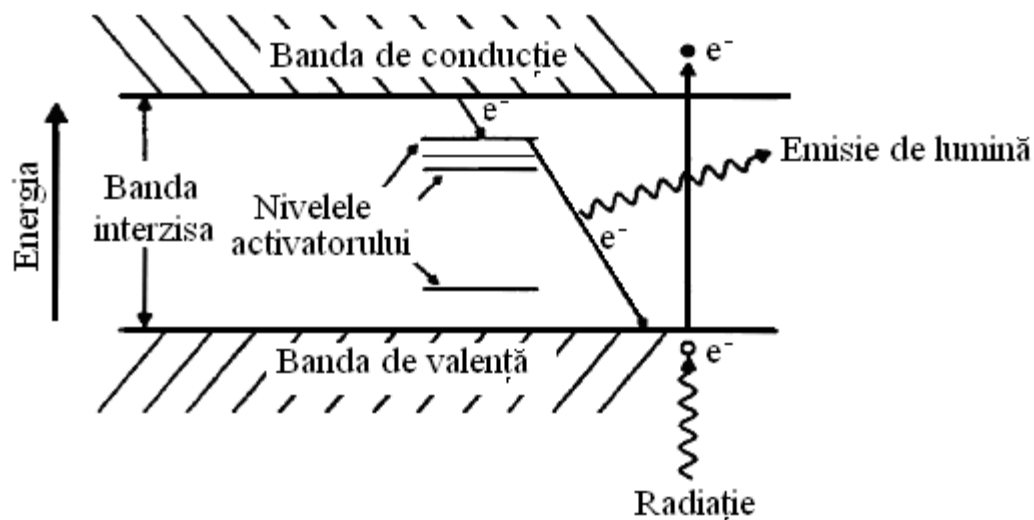
Plastic



Lichid

Scintilatori anorganici

- ▶ monocristale ionice (*de obicei săruri alcaline*)
- ▶ structura electronică formată din *banda de valență* și *banda de conducție*.
- ▶ intermediar - *banda interzisă* cu o valoare destul de mare (de circa 5 eV).
- defecte sau impurități controlate (activatori) în structura cristalului (în mod obișnuit taliiu) conduc la formarea unor nivele energetice în banda interzisă



- La trecerea unei radiații prin materialul cristalin, se crează excitoni (*perechi electron-gol*) cu propria structură de benzi, care se pot mișca liber în cristal. Interacțiunea acestora perechi electron-gol cu atomii activatori (Tl) duce la excitarea nivelelor electronice ale acestora din urmă. Prin dezexcitare se emite o *scintilație*

Principalele cristale de scintilatori anorganici

Material	Densitatea (g/cm²)	λ_{max} (nm)	Timp dezexcitare (ns)	Fotoni per MeV
NaI(Tl) (20° C)	3.67	415	230	38000
NaI pur (-196° C)	3.67	303	60	76000
CsI(Na)	4.51	420	630	39000
CsI(Tl)	4.51	540	800	60000
CsI pur	4.51	315	16	2300
BaF₂	4.9	310	630	10000
CsF	4.64	390	2	2500
CeF₃	6.16	340	27	4400
Lu₂SiO₅(Ce)	7.4	420	40	30000

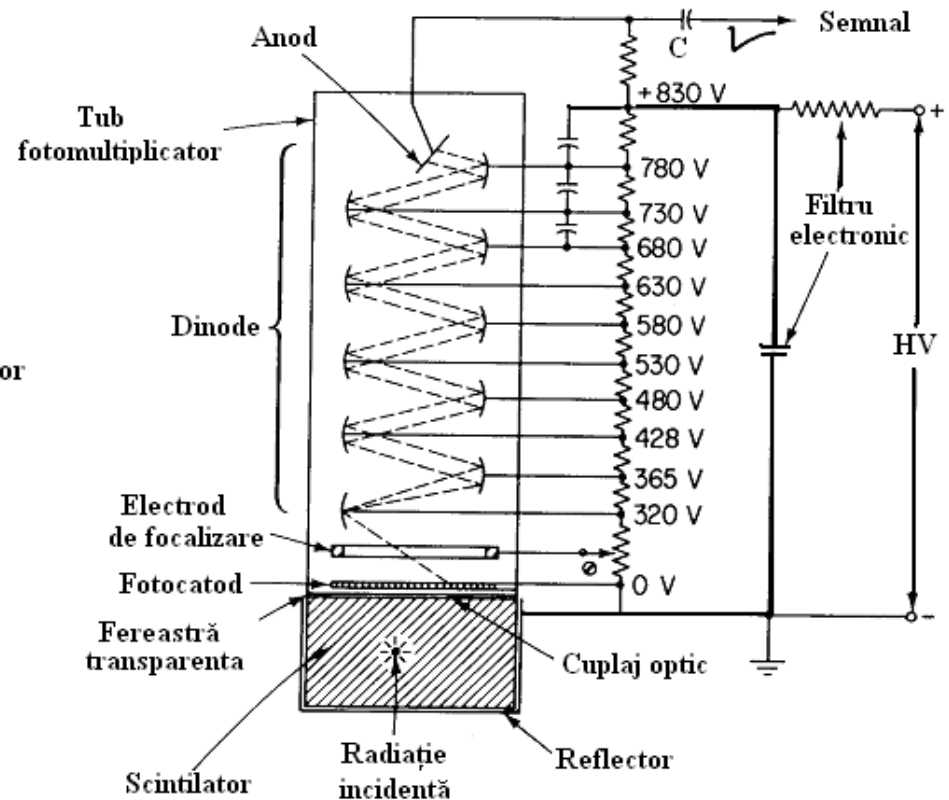
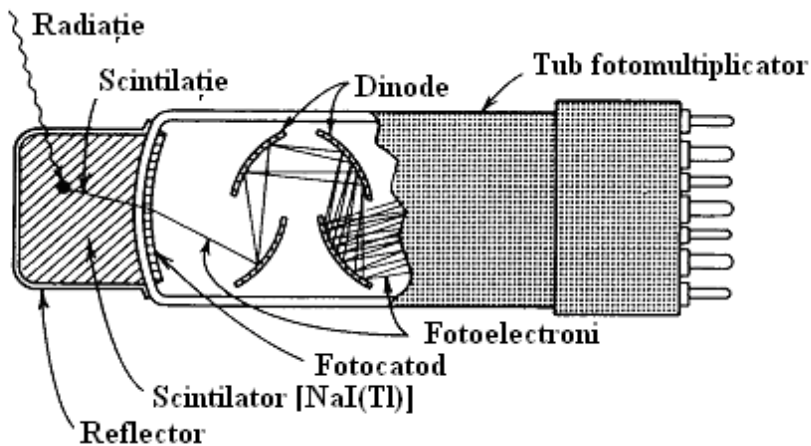


Fotomultiplicatorul

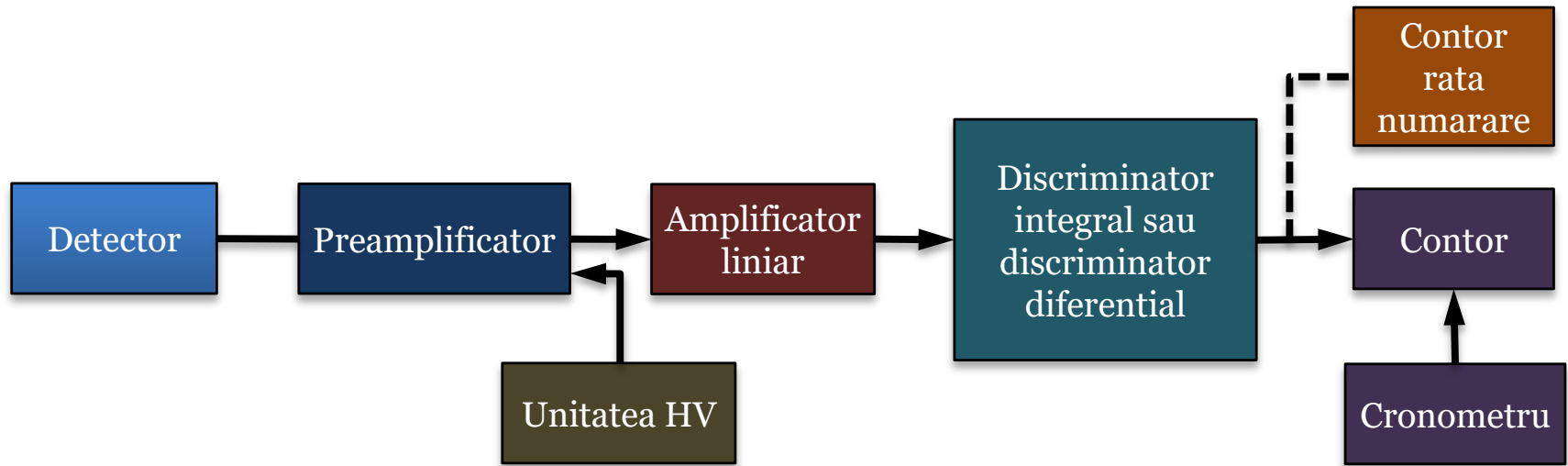
➤ conversie a luminii emise de scintilator în impuls electric

➤ **principale componente - tub vidat**

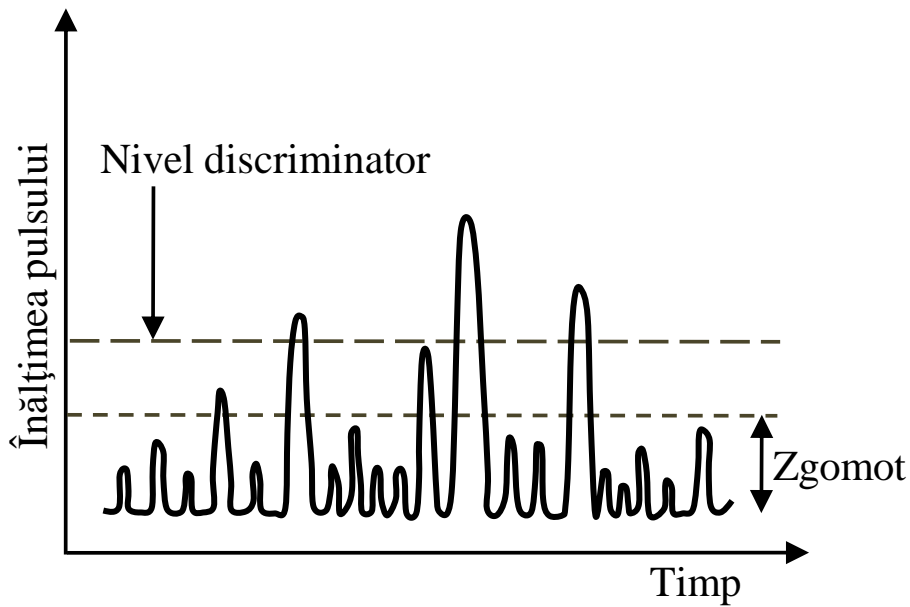
- ▶ *fotocatod*
- ▶ *electrozi de focalizare*
- ▶ *multiplicator de electroni (sistem de dinode)*
- ▶ *anod colector*



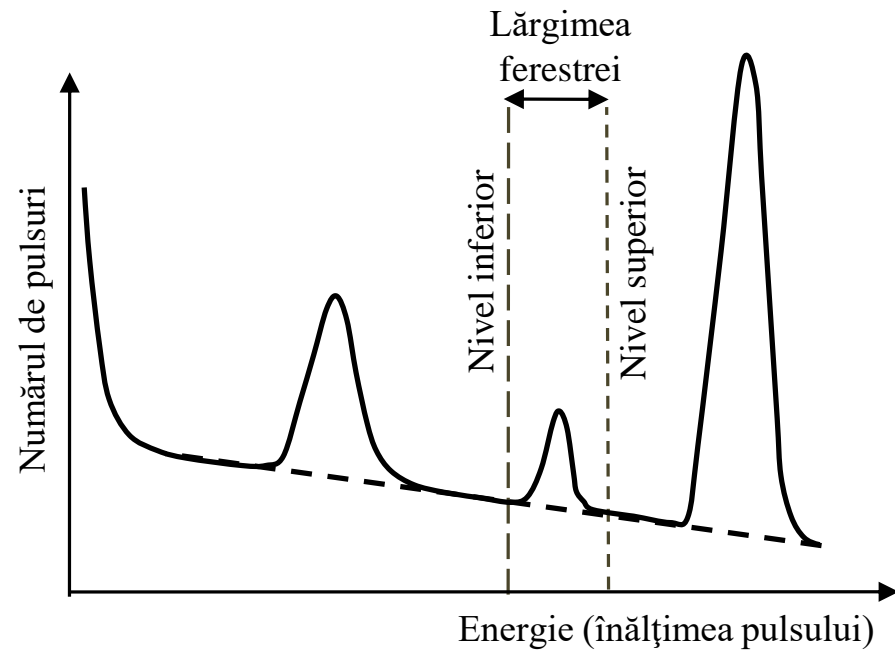
➤ Componentele cele mai comune într-un circuit de măsură



- ✓ **Detectorul** - conectat la o *sursa de alimentare*
- ✓ **Preamplificatorul** - semnalul creat într-un detector este colectat de preamplificator (interfața între detector și electronică de procesare a pulsului)
- ✓ **Amplificatorul liniar** - modelează pulsul de la preamplificator și furnizează o amplificarea la intrarea discriminatorului
- ✓ **Discriminatorul integral** - convertește pulsurile liniare modelate de amplificator în pulsuri logice.
- ✓ **Discriminatorul diferential sau analizorul cu un singur canal** - produce un puls logic la ieșire doar dacă înălțimea pulsului liniar de intrare se găsește între două nivele discriminatoare independente.
- ✓ **Contorul și cronometrul** – rol de acumulare și numărare a pulsurilor logice pe o perioadă de timp; pot opera în două moduri: *presetare timp* și *presetare numărare*.



(a)



(b)

*Spectrul ideal al pulsului și efectul diferitelor setări ale discriminatorului pentru un detector solid, obținut de la un **amplificator (a)** și de la **analizor multicanal (b)***