

# Mag- és neutronfizika

Sugárzás és anyag kölcsönhatása: (ismétlés, összefoglalás)

Elektromosan **töltött** részek **közvetlenül** ionizálnak

(elektronok, protonok, nagy energiájú atommagok)

Ionizáció jellemzője:  $dE/dx$  (Linear Energy Transfer, LET)

Elektromosan **semleges** részecskék **közvetve** ionizálnak

Gamma-sugárzás: **fotoeffektus, Compton-szórás, párkeltés**  
(nagy energiájú **elektronokat** kelt)

Neutron-sugárzás: **rugalmas szórás, atommag-reakció**

(nagy energiájú **protonokat/atommagokat** kelt)

---

## Detektorok

- Működésük a sugárzásnak az anyaggal való kölcsönhatásán alapul.
- **Felerősítik** a sugárzásnak az anyaggal való kölcsönhatásából fakadó jelet makroszkopikus méretűre.

**Az anyagban leadott energia következményei lehetnek:**

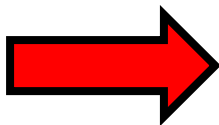
- **ionizáció** → *ionizációs kamra, GM-cső*
- **kémiai ill. fiziko-kémiai változás** → *fotoemulzió, ködkamra...*
- **atomok/molekulák gerjesztése, majd a legerjesztődést követő fényfelvillanás (szcintilláció)** → *szcintillációs detektorok*
- **elektron-lyuk párok keltése félvezetőkben** → *félvezető detektorok*

**Sugárzás áthatolóképessége**

**Érzékelés bonyolultsága**

**Nagyon kicsi**

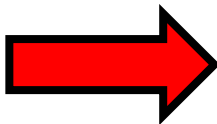
(pl. kis energiájú  $\beta$ ,  
vagy  $\alpha$ -részek)



**Nehéz**, mivel a sugárzás már  
a detektor érzékeny térfogatába  
jutás előtt elnyelődik

**Nagyon nagy**

(pl. neutrínók, vagy  
nagyon nagy energiájú  
részecskék)



**Nehéz**, mivel a sugárzásnak  
kicsi a LET értéke, ezért kis  
térfogatban nagyon kis energiát  
ad csak le. Hatalmas  
térfogatban (és sűrű anyagban)  
lehet csak detektálni

# Detektálási hatások

## Teljes detektálási hatások:

$$\varepsilon_{teljes} = \frac{\text{(detektált részecskeszám)}}{\text{(kibocsátott részecskeszám)}}$$

A teljes detektálási hatások két részből áll:

## Geometriai hatások:

Azt fejezi ki, hogy a forrásból kibocsátott részecskék közül nem mindegyik éri el a detektort.

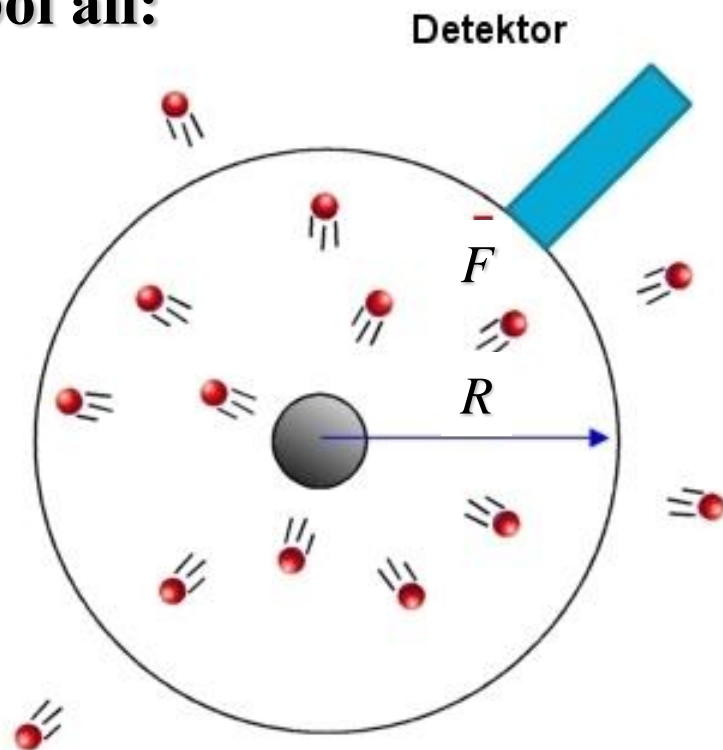
Pontszerű forrás és kis méretű, távoli detektor esetén egyszerűen meghatározható:

$$\varepsilon_G = \frac{F}{4\pi R^2}$$

Itt  $R$  a forrás-detektor távolság,

$F$  pedig a detektor érzékeny felülete

(a forráshoz húzott egyenesre merőlegesen)



**Bonyolultabb geometria (kiterjedt forrás és/vagy detektor) esetén a geometriai hatásfok csak bonyolultabb számítással határozható meg.**

**4π számláló: olyan detektor, amelyre  $\varepsilon_G = 1$ , azaz a forrásból kibocsátott minden részecske eléri a detektort!  
(Ezeknél általában a detektor körülveszi a forrást)**

**Belső (intrinsic) hatásfok**

**A detektor általában nem detektál minden ráeső részecskét.  
(a nagy hatótávolságú részecskék egy része áthalad a detektoron)**

$$\varepsilon_{int} = \frac{\text{(detektált részecskeszám)}}{\text{(detektort **elérő** részecskék száma)}}$$

**A teljes hatásfok tehát:**

$$\varepsilon_{teljes} = \varepsilon_G \cdot \varepsilon_{int}$$

# A detektorok csoportosítása

## Részecskék nyomait láthatóvá tevő detektorok

- Fotoemulzió
- Szilárdtest nyomdetektor
- Ködkamra
- Buborékkamra

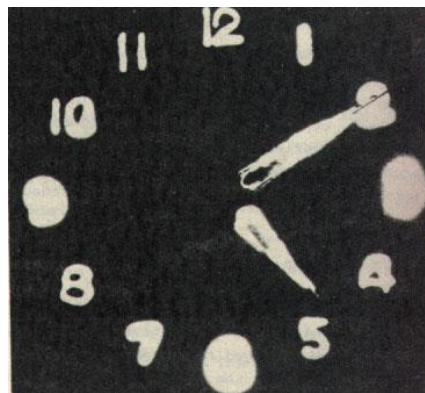
## Részecskeszámlálók

- Gáztöltésű számlálók
  - Ionizációs kamra
  - proporcionális kamra
  - Geiger-Müller számláló (GM-cső)
- Szcintillációs számlálók
- Félvezető detektorok
  - HPGe (nagy tisztaságú germánium)
  - Ge(Li), Si (Li) detektorok
  - Felületi záróréteges detektorok

# Részecskék nyomait láthatóvá tevő detektorok

## 1) Fotoemulzió:

A radioaktivitás felfedezését (Becquerel, 1896) az tette lehetővé, hogy a sugárzás hatására a fényképezőlemez megfeketedett.



radiográfia



film doziméter

mai hasznosítások

## Hogyan működik?

A lemezben AgI és AgBr szemcsék vannak.

- Az ionizáció hatására a molekulák szétesnek, és fém ezüst (Ag) válik ki a részecske pályája mentén (látens kép)
- Az „előhíváskor” ezek a centrumok katalizátorként viselkednek, ezek körül egyre nagyobb méretű „blob”-ok alakulnak ki („jelerősítés”). **Ezek már mikroszkóppal láthatóak.**
- A „fixálás” a blobok növekedését megállítja

## 2) Szilárdtest nyomdetektor

### Hogyan működik?

- Egyes szilárd szigetelőanyagokban a **nagy LET értékű** részecskék roncsolják az anyagot, szubmikroszkópikus anyaghibák keletkeznek (látens kép)
- „Maratás”: a hibák körül gyorsabb oldódás („jelerősítés”), azaz **mikroszkóppal is látható nyomok alakulnak ki.**

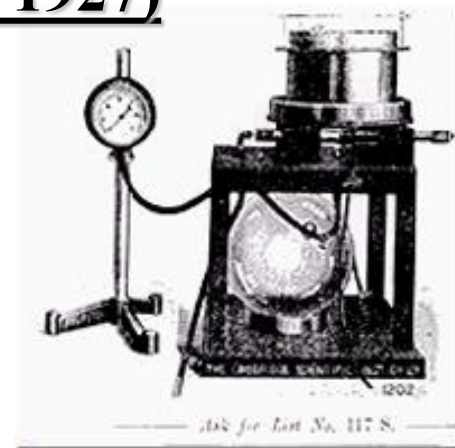
### Leggyakoribb detektoranyagok:

- Cellulóz-nitrát.  $\alpha$ -részecskékre is érzékeny. Környezeti hatásokra is érzékeny, emiatt külön kell kalibrálni. Marószer: NaOH.
- Cellulóz-triacetát (CTA) és cellulóz-acetát-butirát (CAB). Környezeti hatásokra kevésbé érzékeny. Marószer: NaOH.
- Polikarbonátok. Műanyagfólia alakjában készülnek. Csak nehézionok hagynak bennük nyomot. Marószer: NaOH
- Egyes üvegek. Csak nehézionokat ( $A > 32$ ) detektál. Marószer: tömény HF.
- Egyes ásványok (pl. csillám, olivin). Csak nehézionokat ( $A > 28$ ) detektál. Marószer: tömény HF, ill. NaOH, KOH.

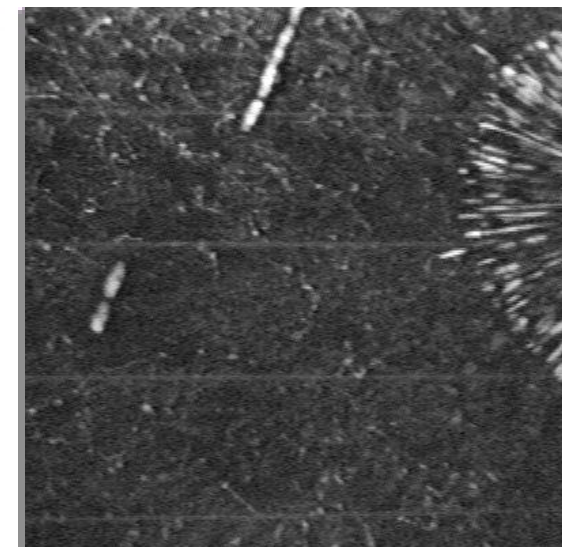
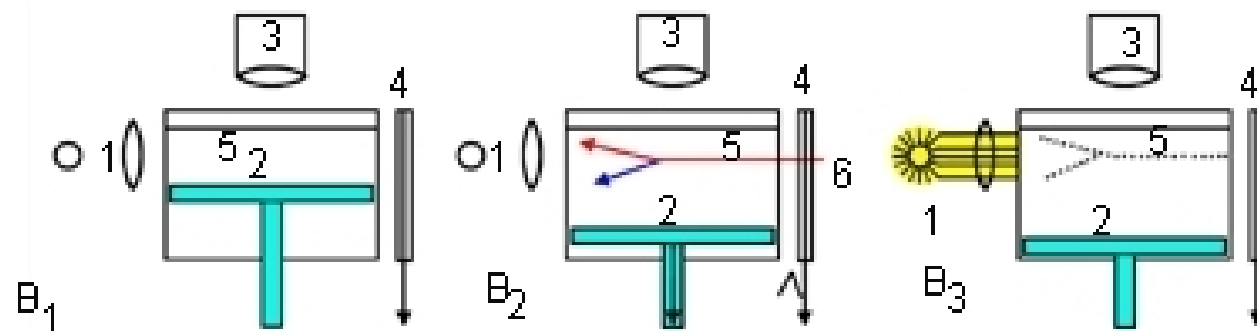
### 3) Ködkamra (C.T.R. Wilson 1869-1959, Nobel-díj 1927)

Hogyan működik?

- **Túltelített gőzben** megindul a köd lecsapódása az ionok, mint lecsapódási centrumok körül („jel erősítése”)
- **Vékony „ködfonal”** alakul ki a részecske pályája mentén.



Az expanziós ködkamra működési elve



**Részecskék képe  
ködkamrában**

nyugalmi állapot ( $B_1$ )

kioldás egy részecske áthaladásakor ( $B_2$ )

a részecskenyom fényképezése ( $B_3$ )

1 fényforrás 2 dugattyú 3 kamera 4 számlálóső 5 üveglemez

6 részecskesugár



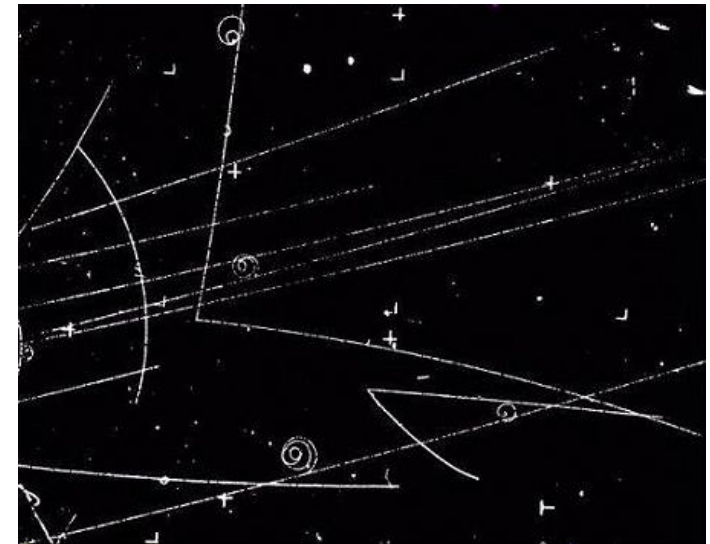
#### 4) Buborékkamra (D.A. Glaser 1926-, Nobel-díj 1960)

Hogyan működik?

- **Tútelített folyadékban** megindul a forrás az ionok, mint zavarcentrumok körül („jel erősítése”)
- Vékony „buborékfonal” alakul ki az ionizáló részecske pályája mentén.

Összehasonlítva a ködkamrával:

- anyagsűrűség nagyobb (folyadék)
  - nagyobb hatásfok (kisebb LET-ű részecskék)
- Hatalmas méreteket lehet készíteni
  - nagyenergiájú részecskék detektálása

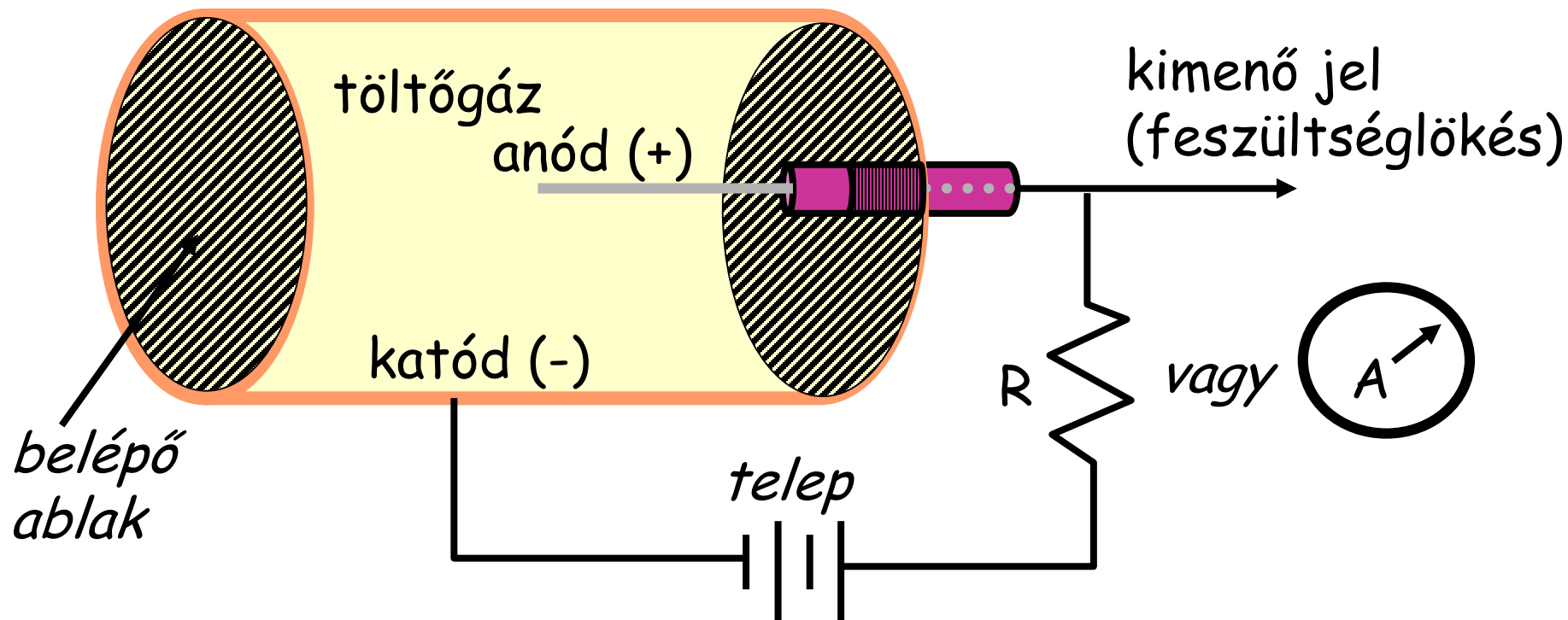


# Részecskeszámlálók

## 1. Gáz töltésű detektorok

Hogyan működik?

- Az ionizáló részecskék a gázban **elektron-ion** párokat keltenek
- A gázban lévő elektródok elektromos tere ezeket **szétválasztja** és **begyűjti** — **elektromos áramlökés** keletkezik
- Az elektromos áramlökést elektronikusan **erősítjük**
- Az erősített impulzusokat **feldolgozzuk**  
(megszámláljuk, amplitúdójukat megmérjük stb.)



## Kétféle üzemmód:

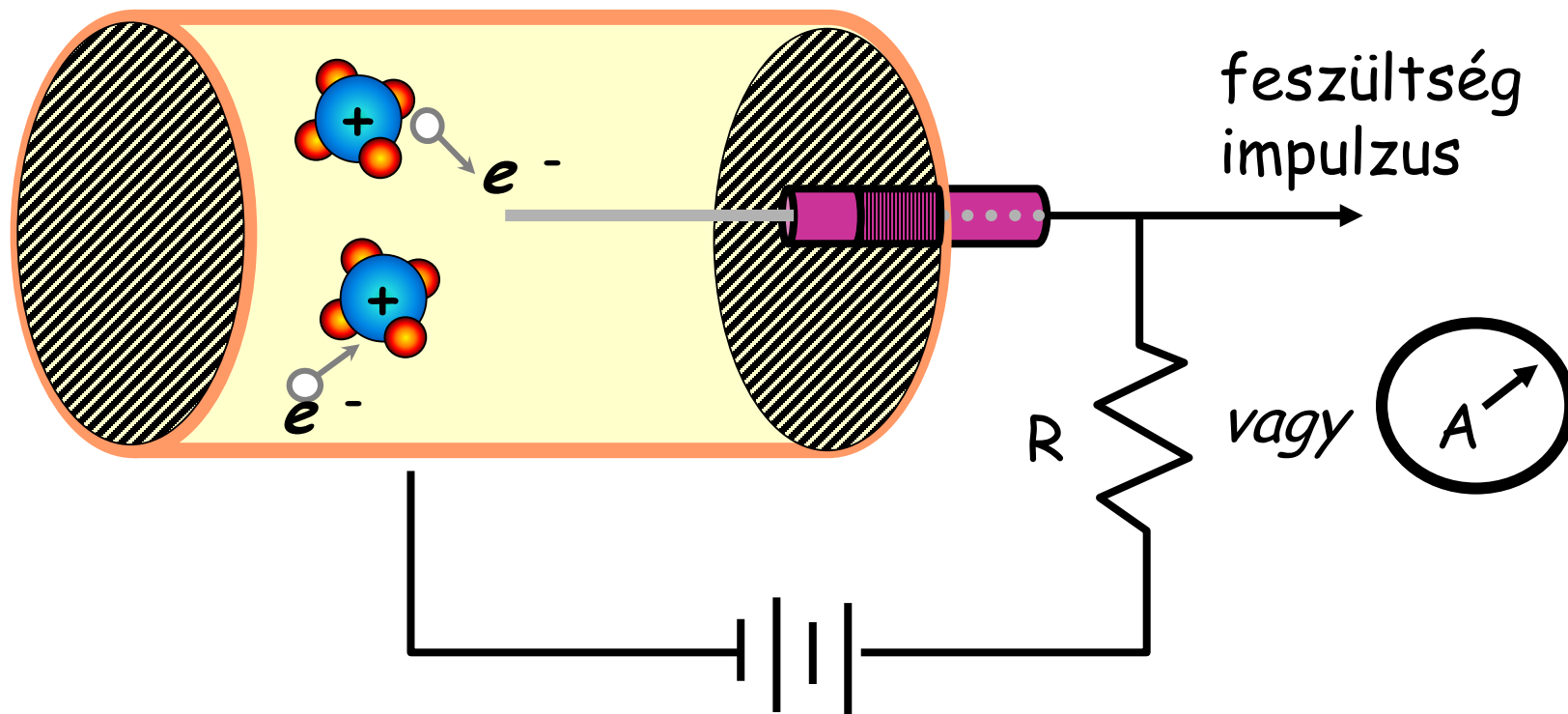
- **Impulzus-üzemmód** (számlálás, amplitúdómérés stb. )
- **Folyamatos áram** (nagy intenzitású sugárterek, pl. reaktor)

## Néhány fontos folyamat a gázban

1) A begyűjtés **ellen** dolgozik a **rekombináció**

(ionok ismét találkoznak elektronokkal, és a már szétvált töltések újra egyesülnek)

Emiatt **elég nagy térerősség kell** a töltések teljes begyűjtéséhez

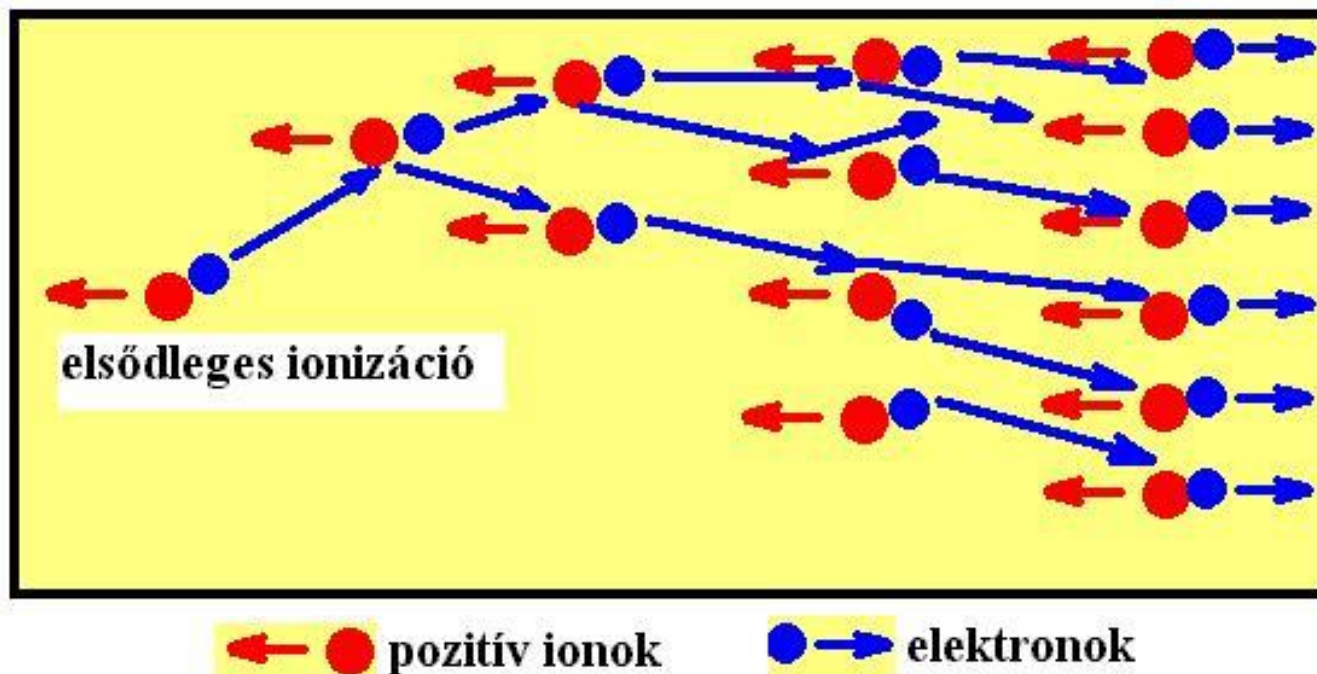


## Néhány fontos folyamat a gázban (2)

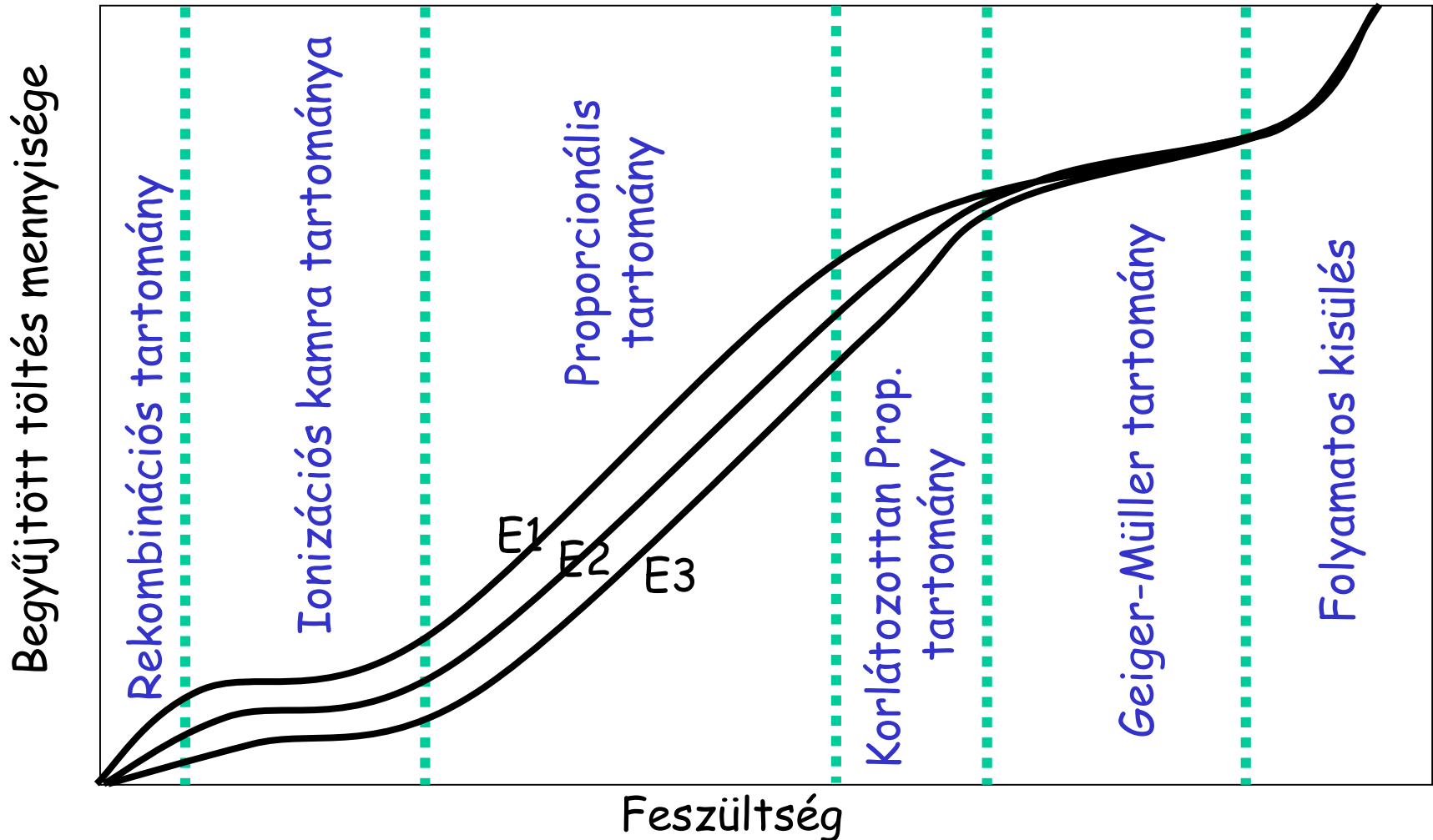
### 2) Gázerősítés (lavina-folyamat)

- Nagy térerősség  $\longrightarrow$  az elektronok két ütközés között nagy mozgási energiát nyernek
- **másodlagosan ionizálnak**, új elektron-ion pár keletkezik.
- **több töltést** lehet begyűjteni, mint amit a detektált részecske választott szét eredetileg

Lavinafolyamat gázokban



Ezek eredményeképpen a jelek amplitúdója (begyűjtött töltés mennyisége) a következőképpen függ a detektorra adott feszültségtől (detektor **karakterisztika**)



**( $E_1 > E_2 > E_3$  a bejövő részecske által a gázban leadott energia)**

## A gáztöltésű detektorok típusai:

- **Ionizációs kamra**

minden elsődleges töltést és iont begyűjtünk, de csak azt!

**Kis amplitúdójú jelek**, nagy utóerősítés kell.

Részecske által leadott **energia mérésére alkalmas**

- **Proporcionális kamra**

gázerősítés még a proporcionális tartományban

nagyobb amplitúdójú jelek

**Energiamérésre alkalmas**

- **Geiger-Müller számláló (GM-cső)**

nagy gázerősítés,

**nagy amplitúdójú jelek**

amplitúdó független a gázban

leadott energiától

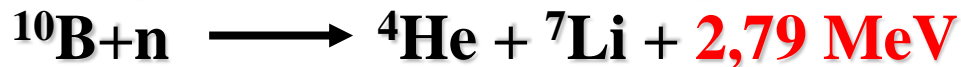
Energiamérésre **nem alkalmas**, csak részecske **számlálásra**



## Neutrondetektorok (probléma: **csak** neutront számláljon, mást ne)

### 1) $\text{BF}_3$ számláló

Lényegében bór-trifluorid gázzal töltött proporcionális kamra.



A keletkezett töltött részecskék ( $^4\text{He}$ , ill.  $^7\text{Li}$ ) kapják az energiát, erősen ionizálnak a gázban  $\longrightarrow$  a kamra impulzust ad ki.

### 2) $^3\text{He}$ számláló

$^3\text{He}$  gázzal töltött proporcionális kamra.



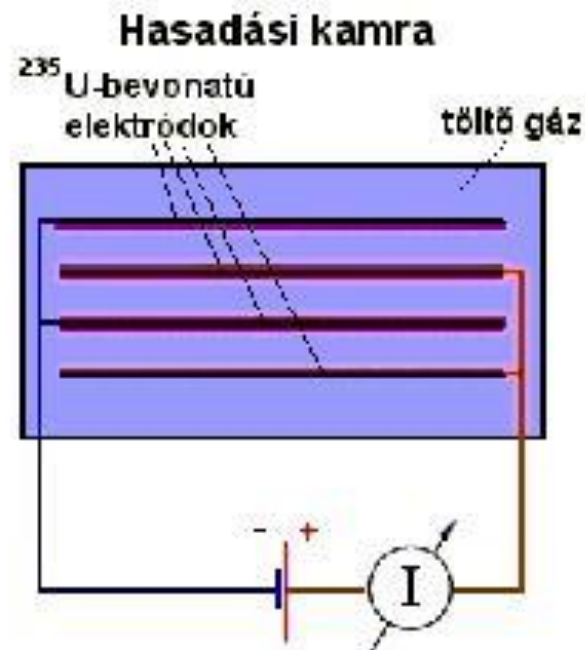
A keletkezett töltött részecskék ( $^3\text{H}$ , ill.  $^1\text{H}$ ) kapják az energiát, erősen ionizálnak a gázban  $\longrightarrow$  a kamra impulzust ad ki.

### 3) Hasadási kamra

proporcionális kamra, amelyben urán-bevonatú lemezek vannak



A hasadás során keletkezett nagy energiájú hasadványok erősen ionizálnak a gázban  $\longrightarrow$  a kamra impulzust ad ki (áramot jelez).



## 2. Szcintillációs detektorok

Egyes anyagokban **fényfelvillanás** (szcintilláció) jön létre, ha energiát kapnak becsapódó részecskéktől

- Fluoreszcencia – azonnali fényfelvillanás ( $t < 10^{-10}$  s)
- Foszforeszcencia – késleltetett fénykibocsátás ( $t > 10^{-10}$  s)

Anyagát tekintve lehet

- szilárd
- folyadék
- gáz
- szervesetlen
- szerves

Már a magfizika őskorában is használták:

„**spintharoscope**” (1903 W. Crookes)

Felépítése: vékony ZnS (cinkszulfid)

réteg, amelyet nagyító figyel

A ZnS-ban a becsapódó részecskék hatására felvillanások (szcintillációk) keletkeznek.





## Szilárd, szervesetlen (kristályos) szcintillátorok

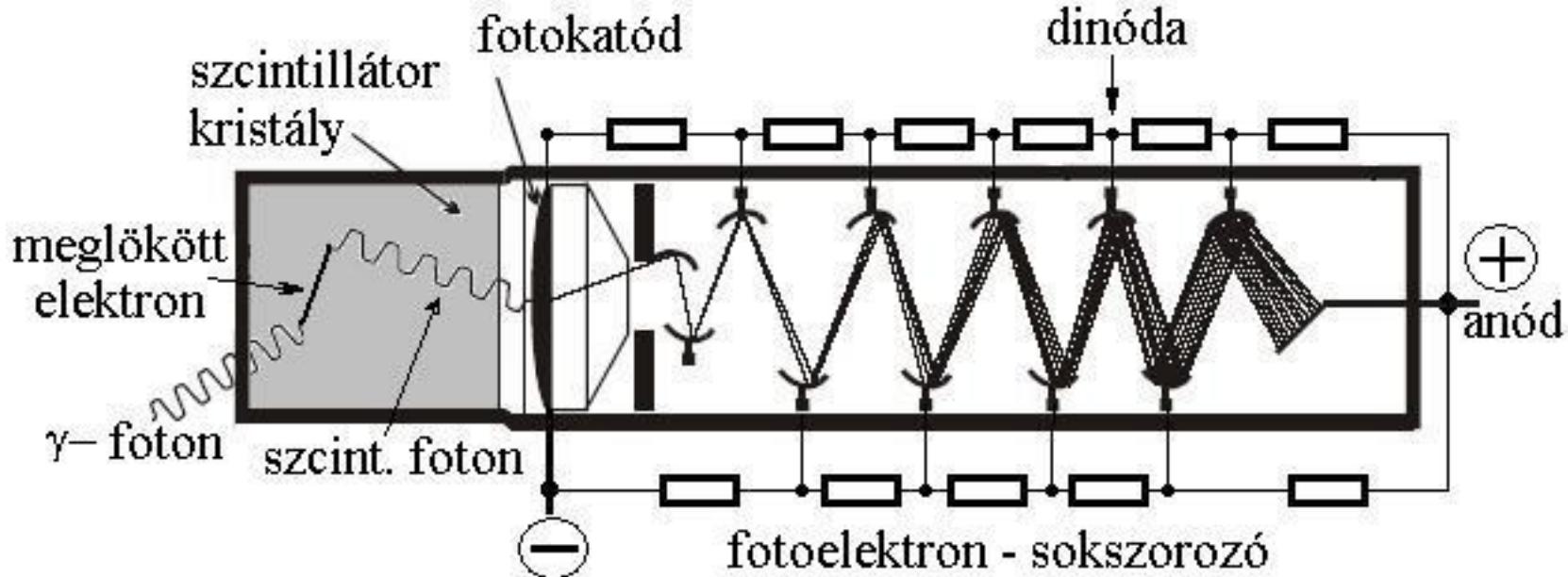
- Többségük ionkristály, valamilyen alkálihalogenid (alkáli fém és halogén vegyülete)
  - **NaI(Tl)** nátriumjodid (talliummal szennyezve)
  - **CsI(Tl)** céziumjodid
  - **LiI(Eu)** lítiumjodid (európiummal szennyezve)
  - **CaF<sub>2</sub>(Eu)** kalciumfluorid
- Szennyezés igen kis mennyiségben (nyomokban)
  - a szennyezés az „aktiváló”, ez biztosítja a felvillanást
  - Pl. Eu a kristályban csak ezreléknyi mennyiségben van

Kristályokból **nagy méreteket** lehet növeszteni

Kettős előny: nagy atomsűrűség (szilárd) nagy méret → **Nagy hatásfokú detektor!**

A szcintillációt ma már nem szabad szemmel figyelik !

**Fotoelektron-sokszorozó** (photomultiplier)



### A detektálás lépései (pl. $\gamma$ -foton detektálása):

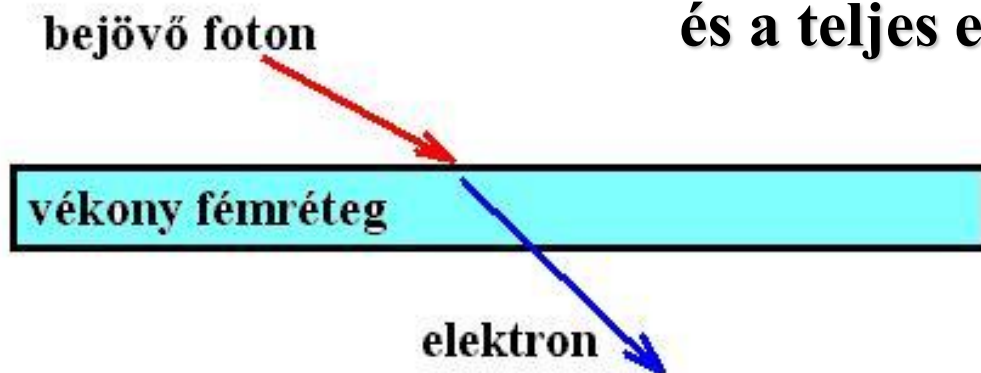
- A  $\gamma$ -foton kölcsönhat a szcintillátor anyagával: energiát ad át egy elektronnak (Compton-szórás, fotoeffektus, párkeltés)
- A keltett elektron az útja mentén energiát ad át a kristálynak ( $dE/dx$ ) és megáll (vagy kiszökik, ha kicsi a kristály)
- Az átadott energiára a kristály szcintillációval felel. Látható fotonok keletkeznek. **A fotonok száma arányos az átadott energiával (!)**
- A keltett (látható) fotonok elhagyják a kristályt, és belépnek a fotoelektron-sokszorozóba

**A fotoelektron-sokszorozó működésében két folyamat lényeges:**

- külső fotoeffektus
- szekunder elektronok

## 1) Külső fotoeffektus

**Foton ütközik egy elektronnal a fémben, és a teljes energiáját átadja neki**



$$E_{elektron} = h\nu - E_{kilépés}$$

**Einstein ennek megmagyarázásáért kapott Nobel-díjat 1922-ben !**

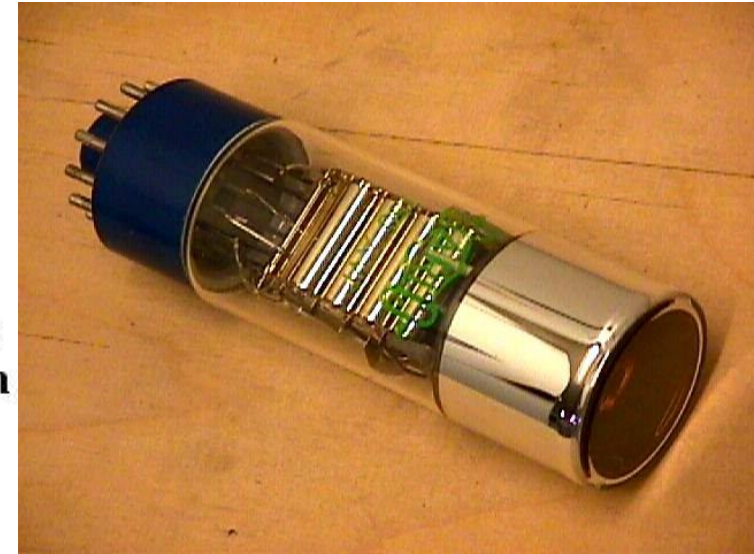
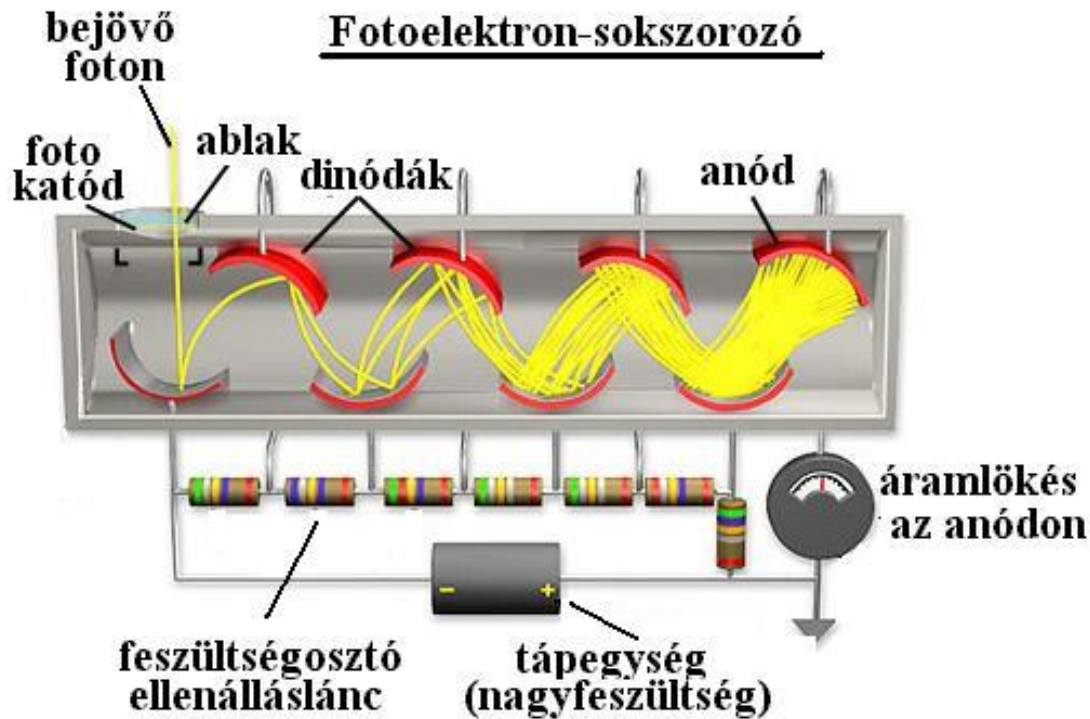
## 2) Szekunder elektronok

**Nagy energiájú elektronok újabb elektronokat ütnek ki**



**A fotoelektron-sokszorozó tehát egy speciális „erősítő”:**

- nagy erősítésű ( $\sim 10^6$ )
- kis zajú



### A működés lépései:

- A beeső foton **külső fotoeffektussal** kiváltja az első fotoelektront a fotokatód anyagából
- az elektron gyorsul az első dinóda felé
- a dinódára beeső gyors elektron **szekunder elektronokat** vált ki
- ezek a következő dinóda felé gyorsulnak, és újabb **szekunder elektronokat** váltanak ki
- ...stb
- végül az anódon begyűjtjük a sok elektront → **áramlökés**

## **Becslés az áramlökések nagyságára:**

**Tegyük fel, hogy az erősítés  $10^6$ , azaz 1 elektrontól  $10^6$  elektron lesz**

**Az áramlökések ideje kb.  $0,1 \mu\text{s} = 10^{-7}$  s. Az áram átlagos nagysága:**

$$I = 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} / 10^{-7} = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ A} = 1,6 \mu\text{A}.$$

## **Szcintillációs kristályt tartalmazó detektor felépítése**



**Fotoelektron-sokszorozót  
+ elektronikát tartalmazó ház**



**szcintillátor kristály (cserélhető)**

**( $\alpha$ , ill.  $\beta$ -sugárzás detektálására  
vékony fémfóliával fedett)**