

Kísérleti magfizika

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:

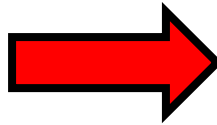
- **ionizáció** → *ionizációs kamra, GM-cső*
- **kémiai ill. fiziko-kémiai változás** → *fotoemulzió, ködkamra...*
- **atomok/molekulák gerjesztése, majd a legerjesztődést követő fényfelvillanás (szcintilláció)** → *szcintillációs detektorok*
- **elektron-lyuk párok keltése félvezetőkben** → *félvezető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

Sugárzás áthatolóképessége

Érzékelés bonyolultsága

Nagyon kicsi

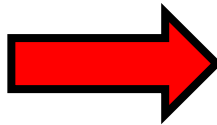
(pl. kis energiájú β ,
vagy α -részek)



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.

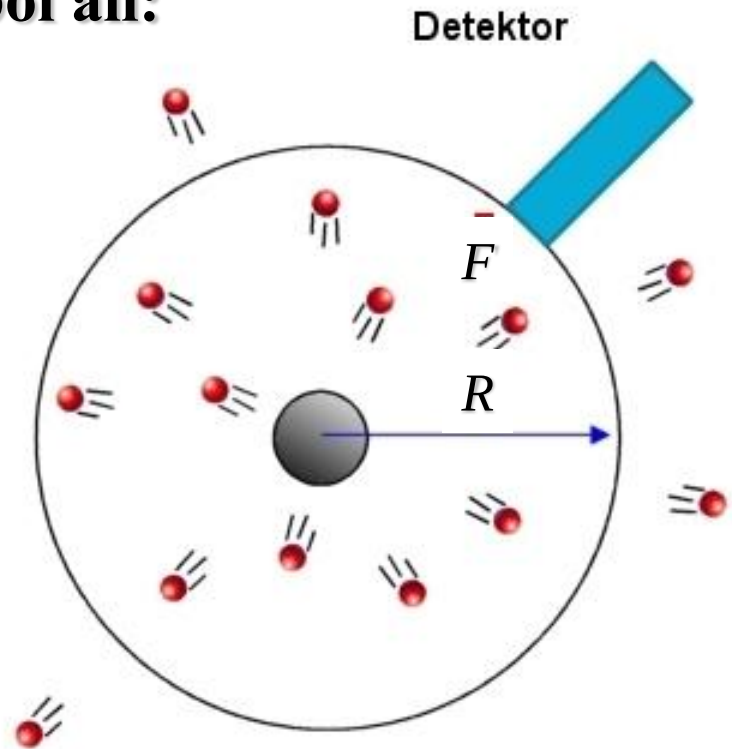
Pontszerű forrás és kis méretű, távoli detektor esetén egyszerűen meghatározható:

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

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 hatások csak bonyolultabb számítással határozható meg.

4 π 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) hatások

**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 hatások tehát:

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

A detektorok csoportosítása

Részecskék nyomait láthatóvá tevő detektorok

- Fotoemulzió
- Szilárdtest nyomdetektor
- Ködkamra
- Buborékkamra

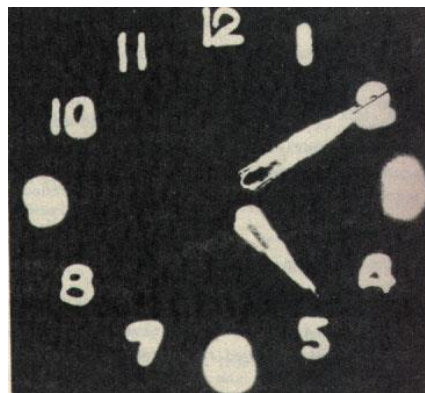
Részecskeszámlálók

- 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.**

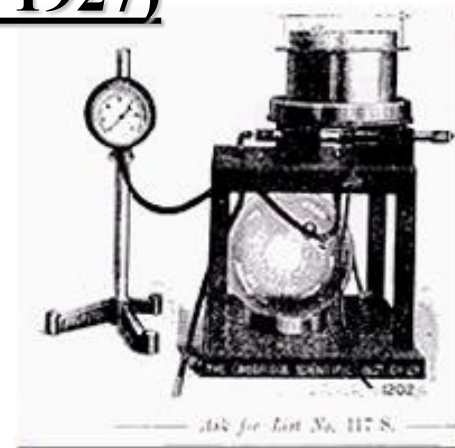
Leggyakoribb detektoranyagok:

- Cellulóz-nitrát. α -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.

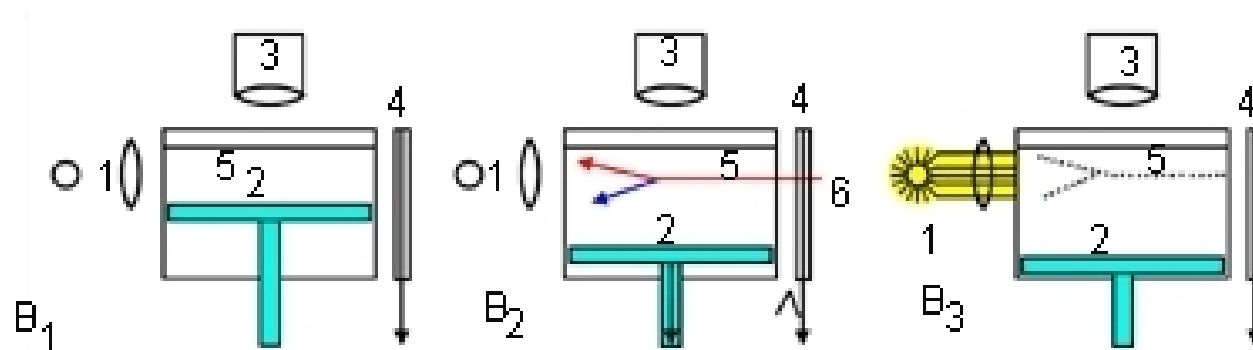
3) Ködkamra (C.T.R. Wilson 1869-1959, Nobel-díj 1927)

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



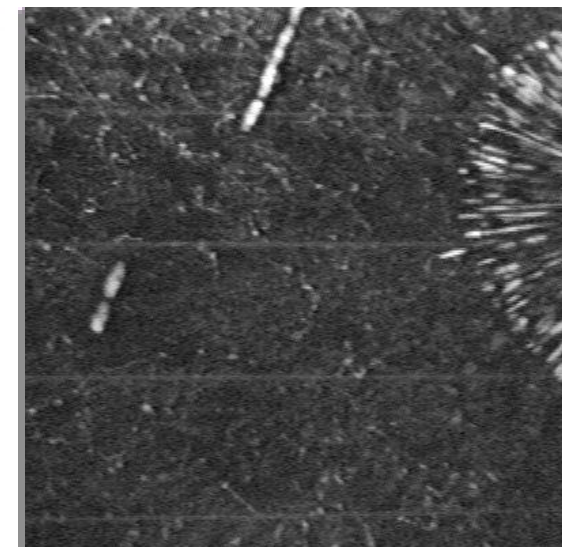
nyugalmi állapot (B_1)

kioldás egy részecske áthaladásakor (B_2)

a részecskenyom fényképezése (B_3)

1 fényforrás 2 dugattyú 3 kamera 4 számlálóső 5 üveglemez

6 részecskesugár



**Részecskék képe
ködkamrában**

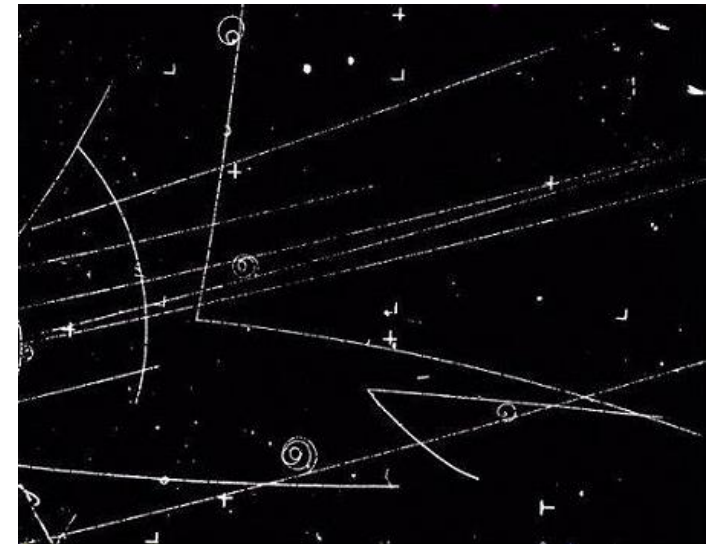
4) Buborékkamra (D.A. Glaser 1926-, Nobel-díj 1960)

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

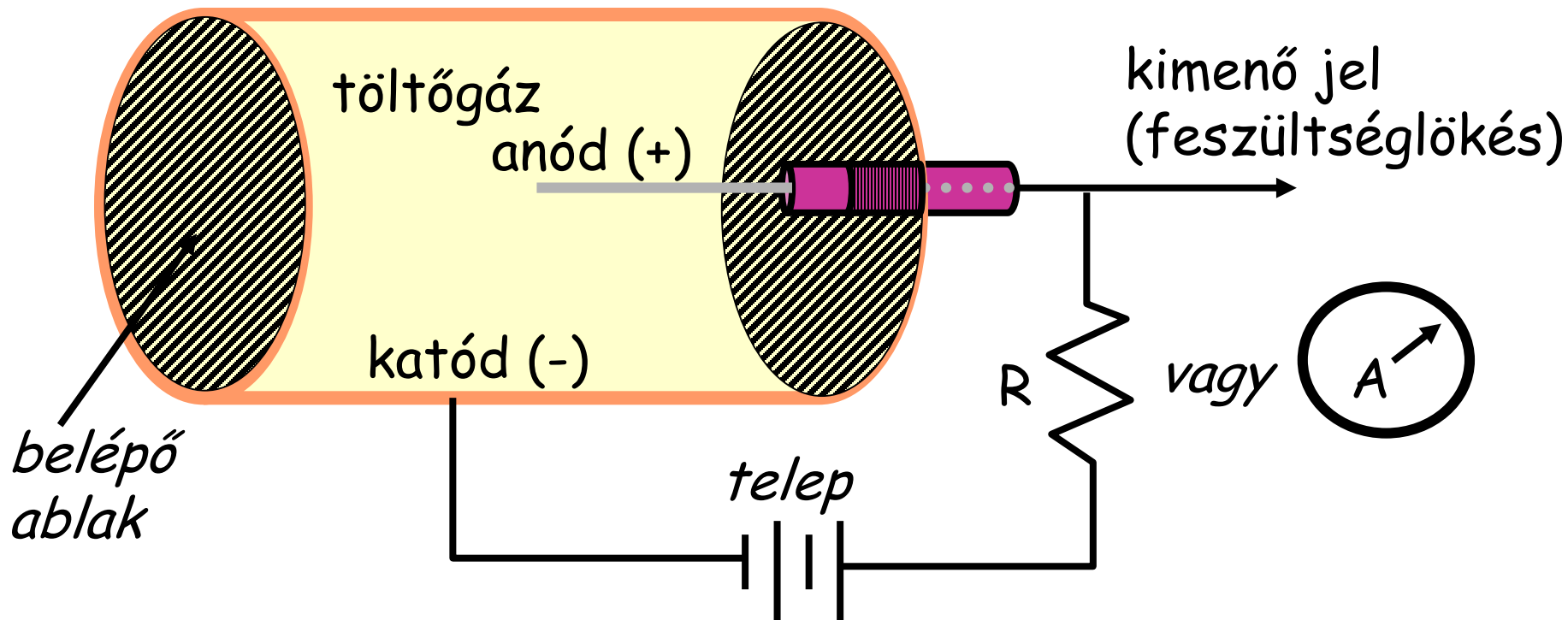


Részecskeszámlálók

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.)



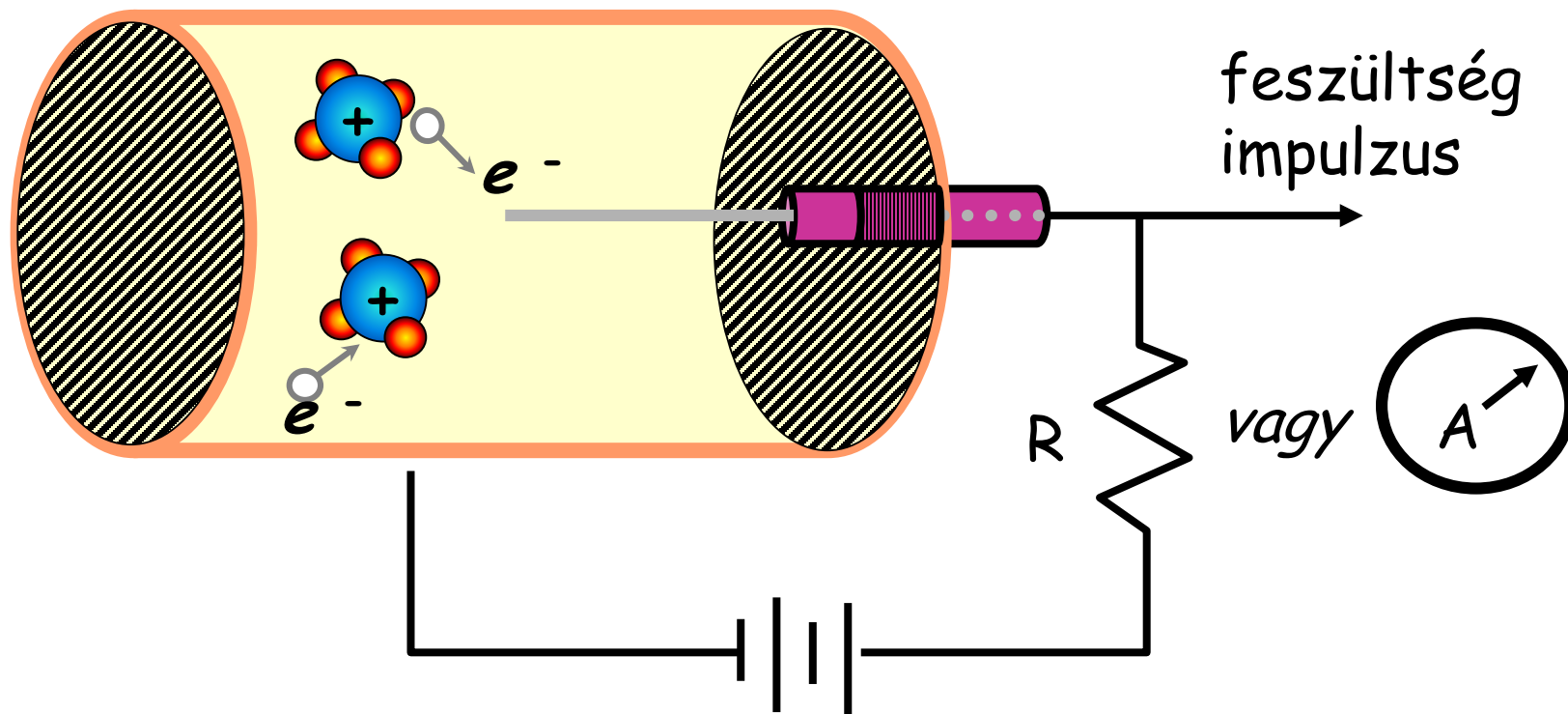
Kétféle üzemmód:

- **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

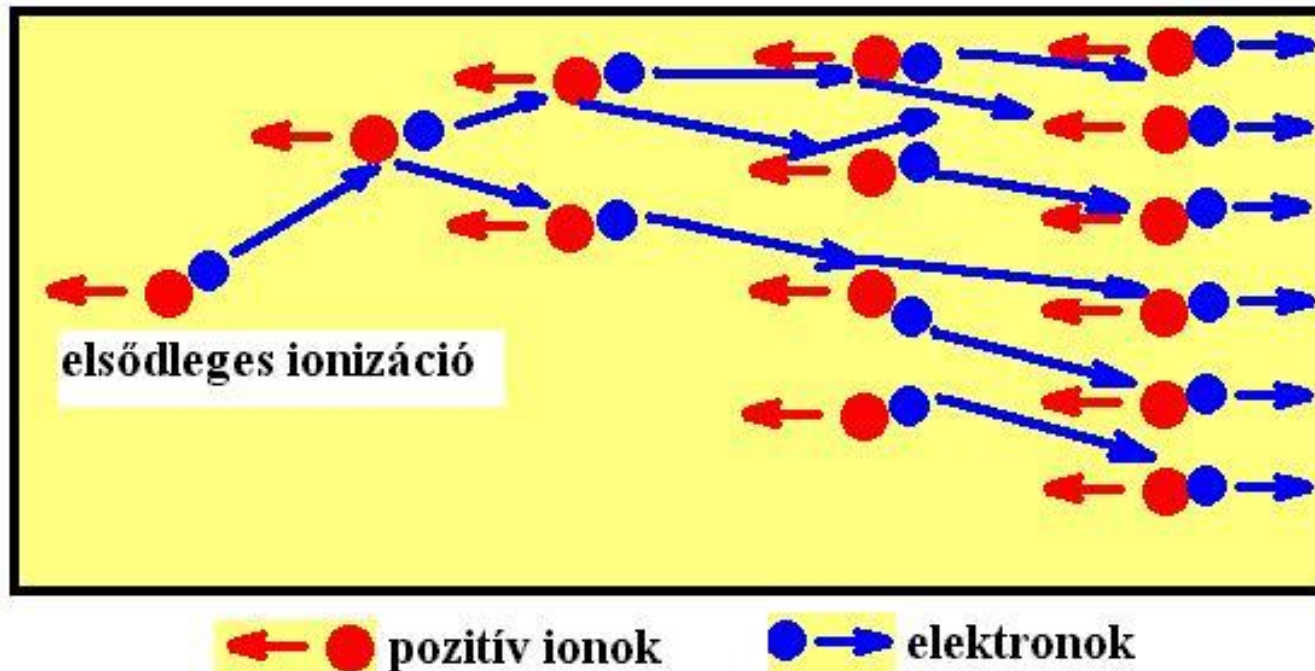


Néhány fontos folyamat a gázban (2)

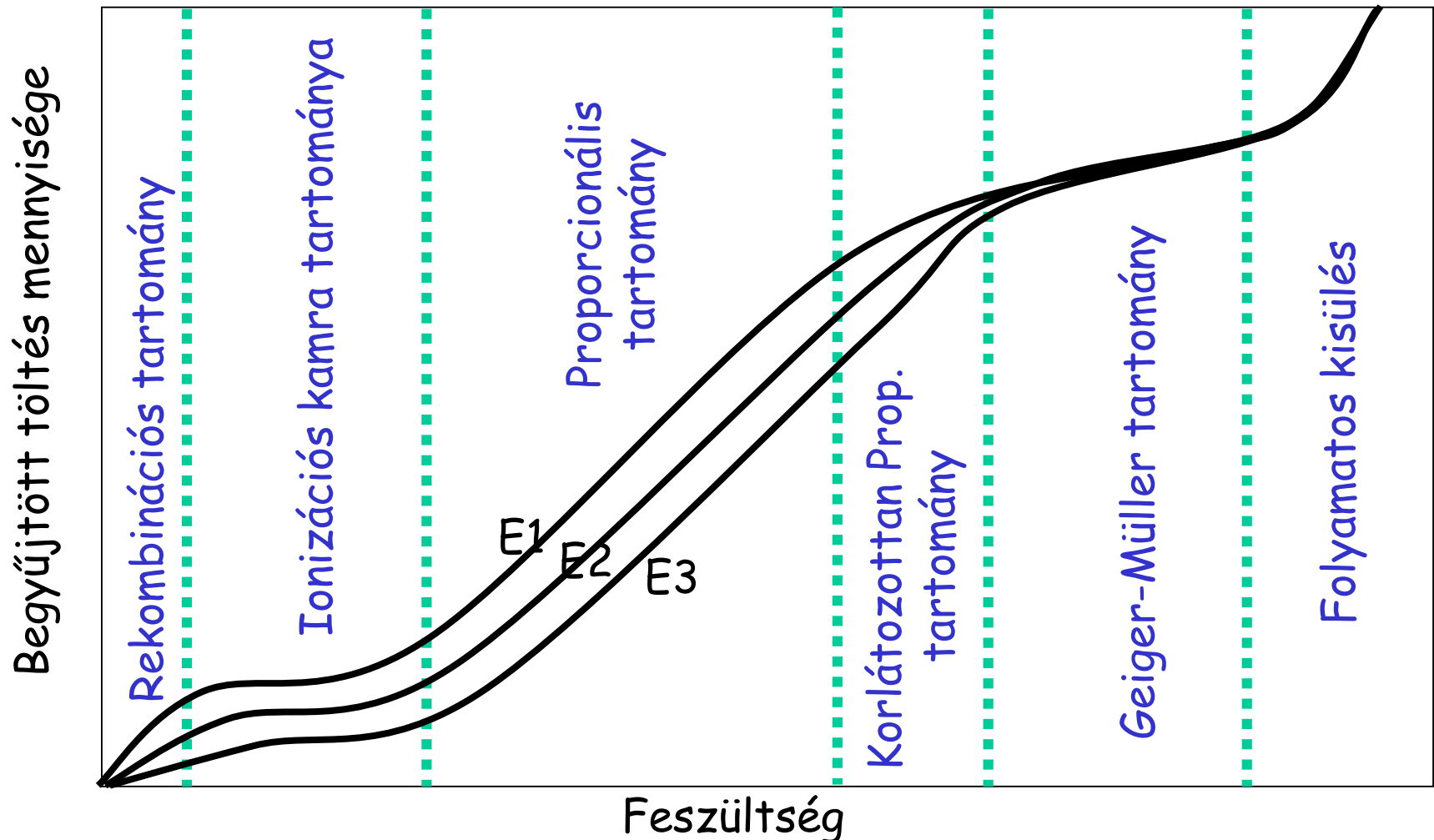
2) Gázerősítés (lavina-folyamat)

- 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

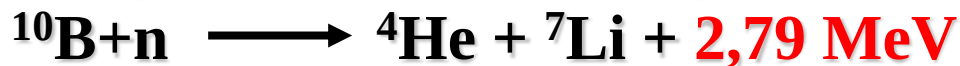
Energiamérésre **nem alkalmas**, csak részecske **számlálásra**



Neutrontektorok (probléma: **csak** neutront számláljon, mást ne)

1) BF_3 számláló

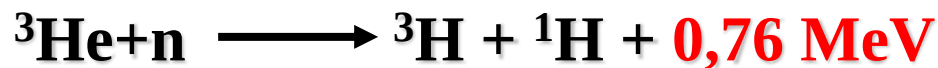
Lényegében bór-trifluorid gázzal töltött proporcionális kamra.



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

2) ^3He számláló

^3He gázzal töltött proporcionális kamra.



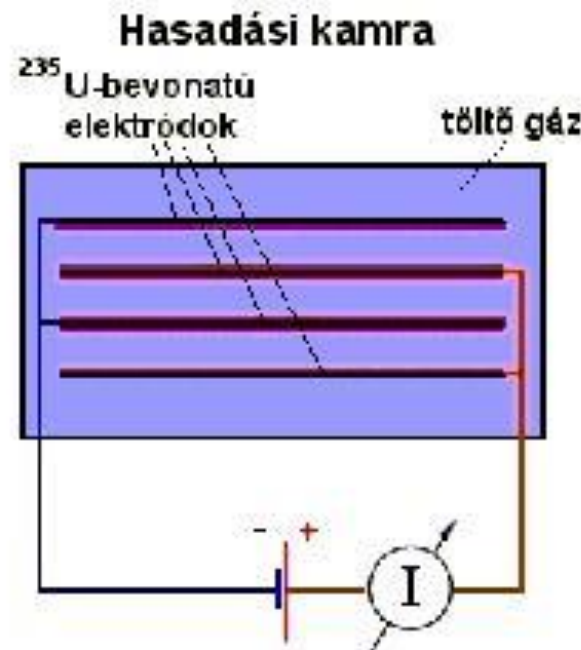
A keletkezett töltött részecskék (^3H , ill. ^1H) kapják az energiát, erősen ionizálnak a gázban $\longrightarrow$ a kamra impulzust ad ki.

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:

„**spinthariscopes**” (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

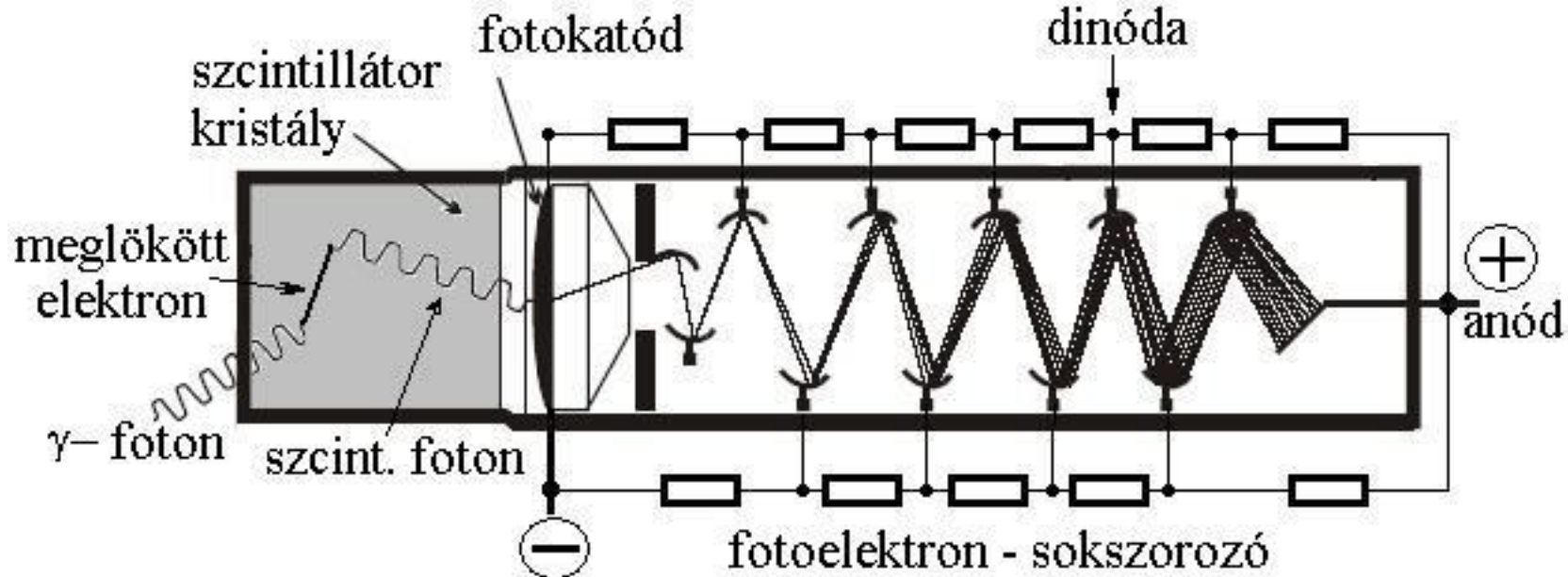
- Többségük ionkristály, valamilyen alkálihalogenid (alkáli fém és halogén vegyülete)
 - o **NaI(Tl)** nátriumjodid (talliummal szennyezve)
 - o **CsI(Tl)** céziumjodid
 - o **LiI(Eu)** lítiumjodid (európiummal szennyezve)
 - o **CaF₂(Eu)** kalciumfluorid
- Szennyezés igen kis mennyiségben (nyomokban)
 - o a szennyezés az „aktiváló”, ez biztosítja a felvillanást
 - o Pl. Eu a kristályban csak ezreléknyi mennyiségben van

Kristályokból **nagy méreteket** lehet növeszteni

Kettős előny: nagy atomsűrűség (szilárd) $\rightarrow$ **Nagy hatásfokú detektor!**
nagy méret

A szcintillációt ma már nem szabad szemmel figyelik !

Fotoelektron-sokszorozó (photomultiplier)



A detektálás lépései (pl. γ -foton detektálása):

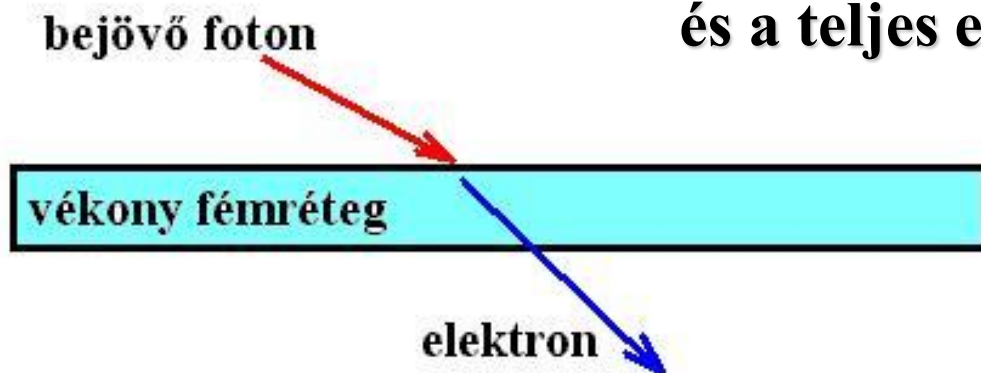
- A γ -foton kölcsönhat a szcintillátor anyagával: energiát ad át egy elektronnak (Compton-szórás, fotoeffektus, párkeltés)
- A keltett elektron az útja mentén energiát ad át a kristálynak (dE/dx) és megáll (vagy kiszökik, ha kicsi a kristály)
- Az átadott energiára a kristály szcintillációval felel. 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 fémbe, és a teljes energiáját átadja neki

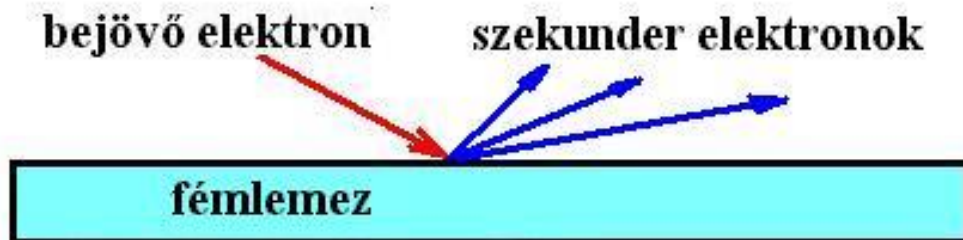


$$E_{\text{elektron}} = h\nu - E_{\text{kilépés}}$$

Einstein ennek megmagyarázásáért kapott Nobel-díjat 1922-ben !

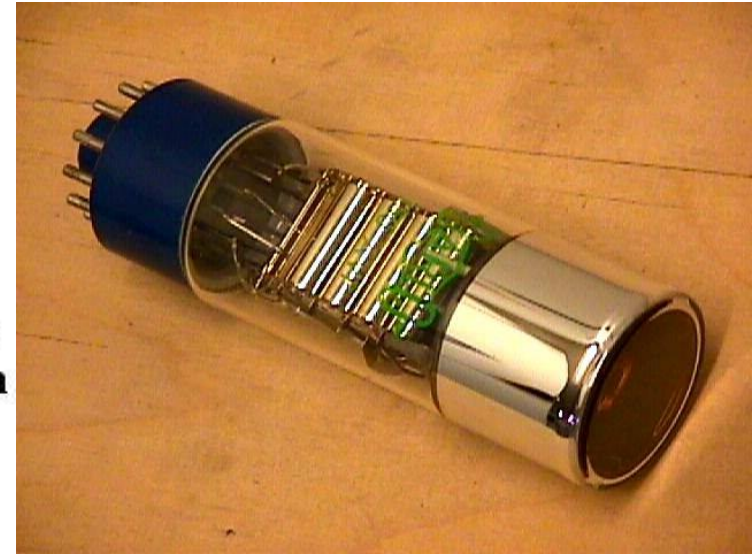
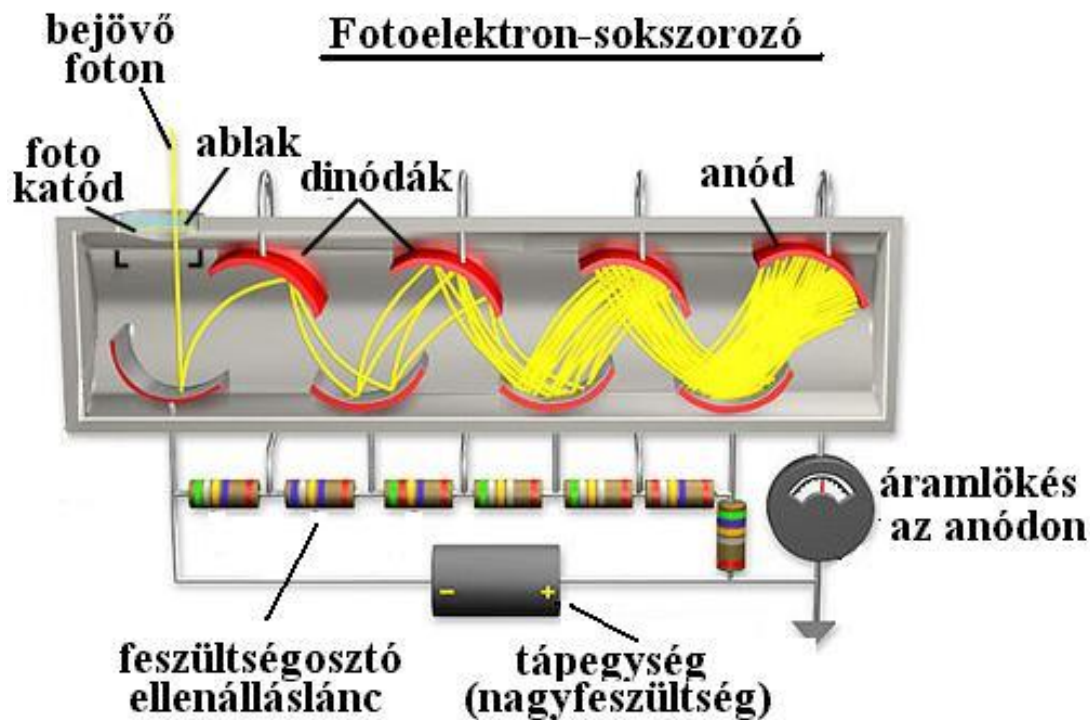
2) Szekunder elektronok

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**

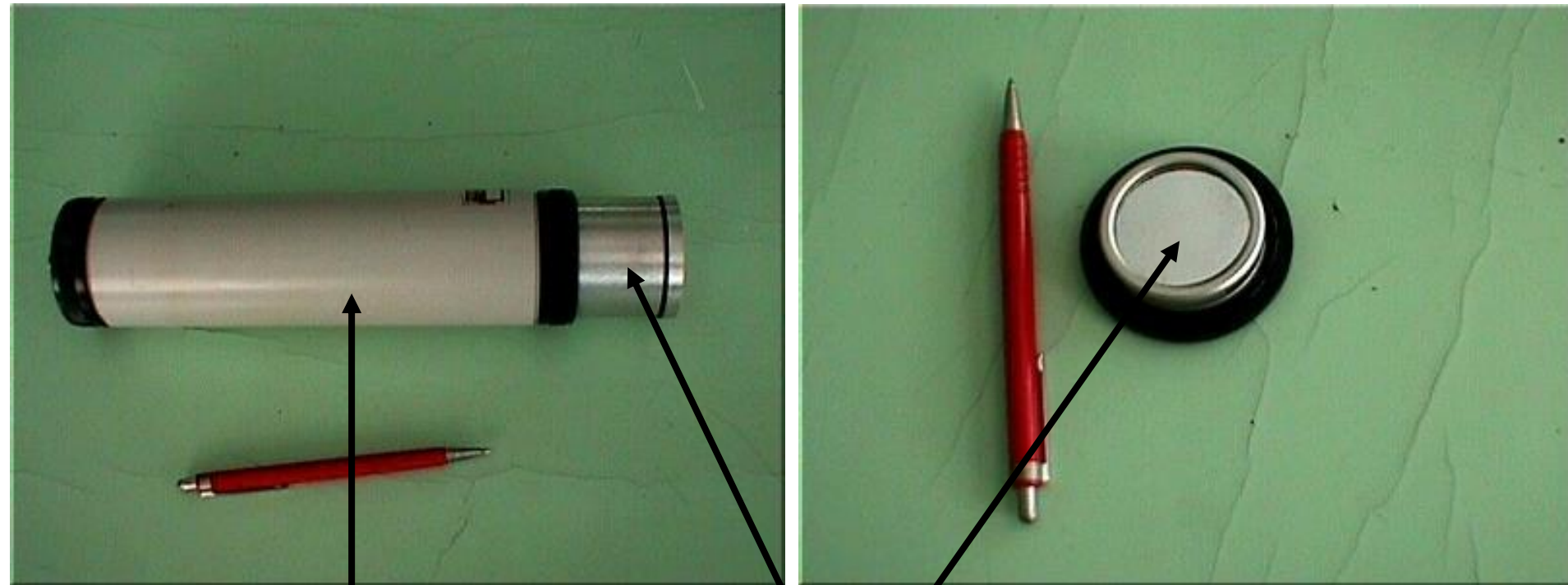
Becslés az áramlökés nagyságára:

Tegyük fel, hogy az erősítés 10^6 , azaz 1 elektronból 10^6 elektron lesz

Az áramlökés ideje kb. $0,1 \mu\text{s} = 10^{-7} \text{ s}$. 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)

**(α , ill. β -sugárzás detektálására
vékony fémfóliával fedett)**