



# A magkémia alapjai

**Nukleáris detektorok, gamma-spektroszkópia,  
jelanalízis**



**Nagy Sándor**

**ELTE, Kémiai Intézet**

**A detektálás alapja**, akár energiaszelektív detektorról van szó, akár egyszerű részecskeszámlálóról, rendszerint **az ionizáció**

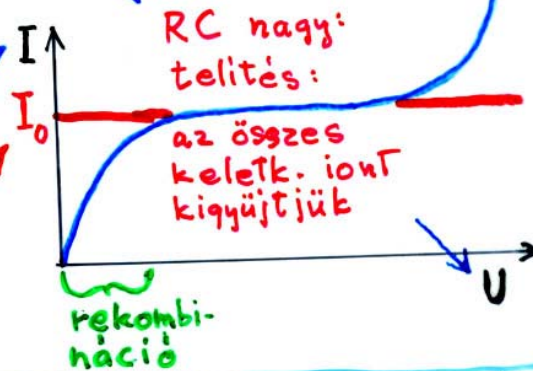
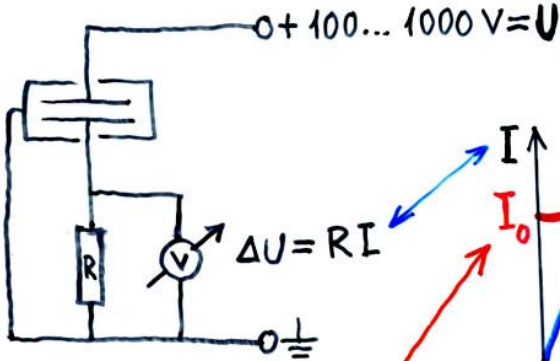
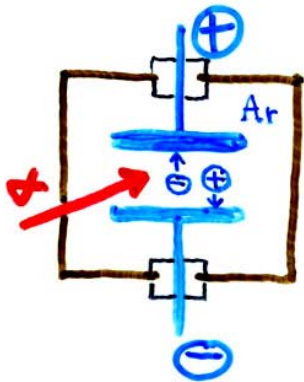
$\alpha, \beta, p, d$  közvetlenül hoznak létre ionokat a pályájuk mentén.

$\gamma$  fotoeffektus stb. révén konvertálódik " $\beta$ "-vá (azaz  $\delta$ -vá).

$n$  ha gyors  $n^* + H \rightarrow n + p^*$  ütközésben hoz létre gyors protont. Ha lassú (v. akármilyen), akkor pl. a köv. reakcióval konvertálható  $\alpha$ -vá:



## Ionizációs kamra (telítési tartomány)



$$I_0 = A_m \bar{n}_i e$$

$A_m$  = megfigyelt aktivitás (részecske/s)

$\bar{n}_i$  = ionpárok átl. száma/részecske

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad A_m \sim I_0$$

Ha a töltésgyűjtés RC időállandója elég kicsi, akkor egy jó AC-erősítővel egyedi impulzusok is mérhetők.  
Háttér:  $< 1\alpha/10 \text{ min}$ , ill.  $< 1f/\text{nap}$  !!!  
Alkalmos kevés  $f$  sok  $\alpha$  mellett mérésére

- (Közvetlenül) ionizáló sugárzás
- Közvetve ionizáló sugárzás

• Gázionizációs detektorok W

• Ionizációs kamra: a jelek sokaságát egybeméri. Áramerősség arányos a jelfrekvenciával.

• Geiger-Müller-számláló W (G-M-cső): csak jelszámot mér, energiát nem.

• Proporciónális számláló W: a jel amplitúdója arányos a részecske (leadott) energiájával

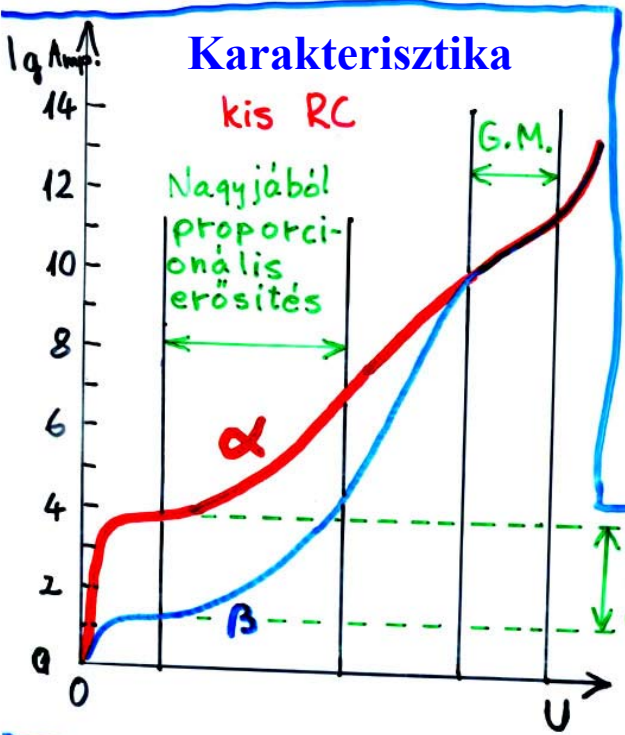
• A  $\gamma$ -sugárzást kis hatásfokkal mérik.

**Miért?**

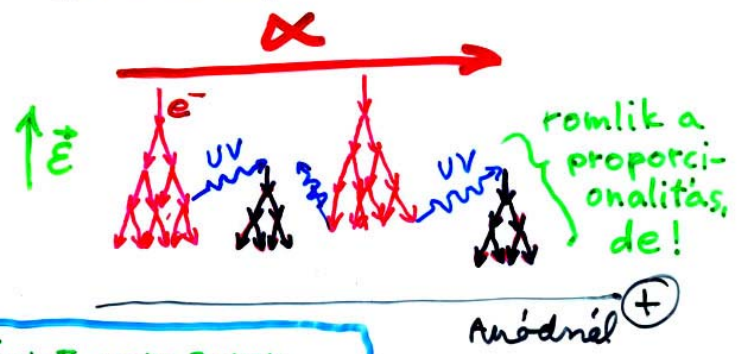


# Sokszorozási tartomány (proporcionális számláló és GM-cső)

Itt mindig kis RC-vel, tehát impulzus üzemmódban szokás dolgozni. A működés alapja, hogy a felgyorsult elektronok ionizálnak és ionkaskádót indítanak el. **Különbség az egyszerű ionizációs kamrához képest: Tiszta Ar nem jó, mert a kisülési folyamatot időben le kell állítani valamilyen adalékkal.**



① A proporcionális feltétele, hogy az egyen elektronok legyenek egymástól  $\rightarrow$  kis térrészre korlátozódnak.



Emiatt nem zavar a  $\beta$  az  $\alpha$  mellett az ionizációs kamrában

A folyamat során keletkező UV fotonok bárhol újabb lavinákat indíthatnak el, ezért olyan adalék-ta van szükség, amely elnyeli őket.  $(CH_4)$ ,  $O_2$  és egyéb elektronaceptorok kerülendők.

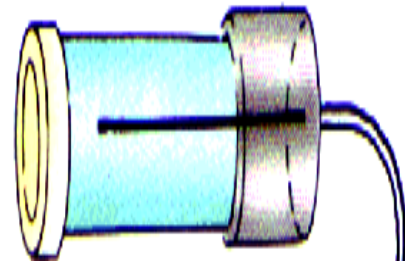
② Ha a feszültség jó nagy, a piramis egyre alacsonyabb és egyre több emeletről áll. Végül az aljára érve, és a kisülés az egész anódra kiterjed  $\rightarrow$  az amplitudó függetlenné válik a primer elektrontól származó, tehát a számláló rész energiájától. És a GM-cső A folyamatban az UV fotonoknak fontos szerepük van.



- Proporcionális számláló és G-M cső feszültség-karakterisztikája
- Miből látszik a proporcionális?

1. Proporcionális feltétele
2. A G-M cső működési feltétele

## 3. Koaxiális dizájn a nyerő!





$$\text{grad } V = \nabla V \sim \frac{1}{r} \quad \begin{array}{c} E \\ \downarrow \\ \text{---} \end{array} \quad \begin{array}{c} E \\ \downarrow \\ \text{---} \end{array}$$

③ A proporcionalitásnak van egy másik feltétele is: ne nagyon függjön a szorzószámi tényező attól, hogy hol adta le a részecske az energiáját. Széles körűen az energiát annál nagyobb a szorzószáma, minél messzebb keletkezett a primer elektron az anódtól. Ilyen elrendezés mellett viszont az anód mellett akár  $100 \times$  ~~akkora~~ is lehet a  $\nabla V$ , mint a katód körül, vagyis mindegy, hogy hol épződtek a primer elektronok, a lavina csak a nál körülben indul be. Az ①-es elektronok szemmel szembe fordítottak jobban, mint a ②-es.



• Térerősség koaxiális és sík elektródpaár között



3. A koaxiális dizájn előnye a proporcionalitás szempontjából

4. A régi G-M csövek működési feltételeinek javítása szerves adalékkal

5. A G-M cső **holtideje**: az az idő, ami ahhoz kell, hogy a detektor eredeti állapota helyreálljon, hogy újabb részecskét tudjon észlelni

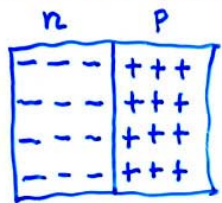
④ A GM csőnél már a probléma. Mivel a fess. nagy (általában) a keletkező  $\text{Ar}^+$  ionok általa energiával csapódnak be a katódra, hogy fotonokat és elektronokat válthatnak ki. Az időben elhúzó pozitívion-izgatás így végül folyamatos károsítást idéz elő. Az ilyen jellegű folyamatos károsítás a problémán



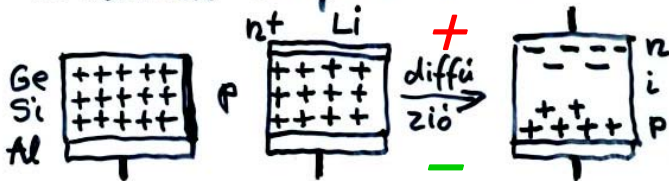
A stafétát átvevő szerves ion nyugalmatlanul csapódik be a katódra (néttörésként), így az elektronkiváltás elmarad. Az inver. folyamat miatt minden egyes impulzus csökkenti a cső élettartamát. ( $\Sigma = 10^8 \dots 10^9$  beütés)

⑤ A GM csőnél a  $\oplus$  ionok izgatása  $100 \dots 500 \mu\text{s}$  (nagyon az elektronok  $0,5 \mu\text{s}$ -ával) miatt a holtidő is hasonló nagyságrendű.

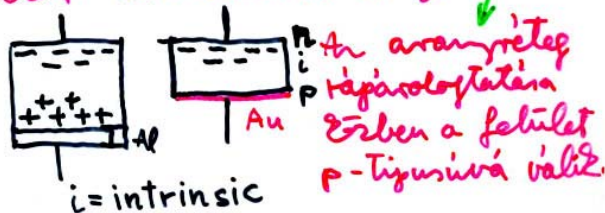
# Félvezető detektorok = szilárd ionizációs kamrák



Lítiummal driftelt Ge és Si



Olyan érzékelő réteget alkotnak Si, amiben eleve alig van töltéshordozó. A felületi záróréteges detektor  $\alpha$ -mérése is jó.



## Jellemzőik:

- Igen jó energiateljesítmény, nagy termikus zaj (a Ge(Li) detektor képes: csak szapp. N<sub>2</sub>-ben lehet ültetni!)
- $\gamma$ -spektroszkópia  $\equiv$  Ge(Li) or Ge

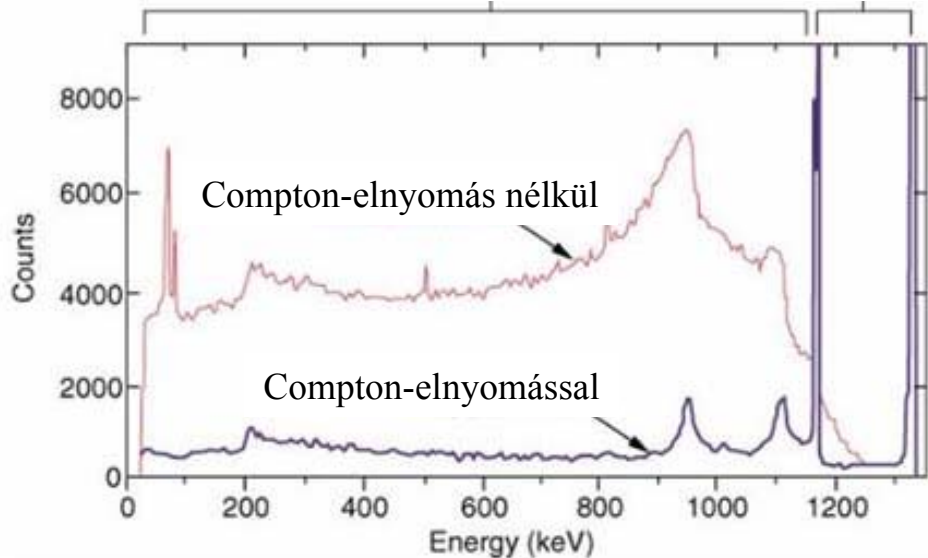
## Félvezető detektorok W

- Ge, Si: Li-vel driftelt, Ge(Li), Si(Li).
- Elektromos térrel „diffundáltatják” be a Li<sup>+</sup> ionokat a Si vagy a Ge kristályrácsába, ahol ezáltal kompenzálódnak, az ionos szennyezések
- Felületi záróréteges
- Ge: nagy tisztaságú, HPGGe (high-purity germanium). Jobb a Ge  $\gamma$ -spektroszkópiára, mint a Si, mert nagyobb a Z<sup>4</sup>. Ez a fotoeffektushoz kell.

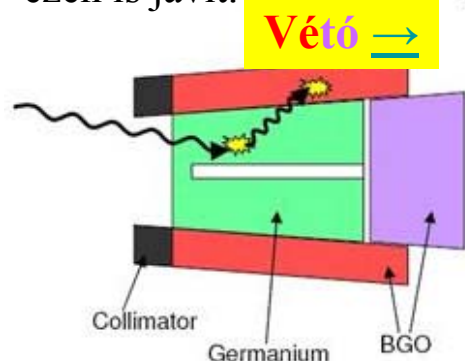
Compton-háttér

Fotocsúcs

BGO: Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub> szcinti  $\Rightarrow$



- A Compton-elnyomás antikoincidenciával még ezen is javít.

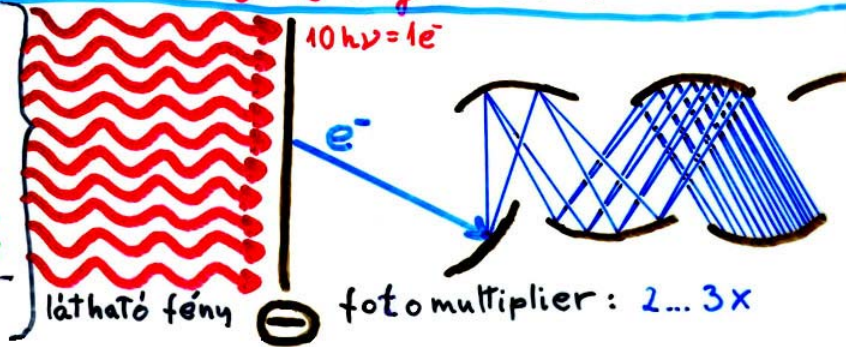




# Fényemisszió alapuló módszerek

1. Szcintillációs detektorok → impulzus számlálás és energiameérés
2. Termolumineszcens detekt. → dózismérés (TLD)
3. Cserenkov-számláló → impulusszámlálás és energiameérés

1. & 2. Ionizáció, majd gerjesztés, spontán (1), illetve kitémyszerített (2) legerjesztődés után  $30\text{eV} = 1\text{h}\nu$
3. Vízben  $\beta > 265\text{keV}$ ,  $p > 500\text{MeV}$   
 $\pi > 73\text{MeV}$  spontán Cserenkov-sugárzás.



## Fényemisszió alapuló detektorok

- Szcintillációs ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ): ZnS, pasztik, NaI(Tl)
- Termolumineszcens doziméter, TLD, ( $\gamma$ , n):  $\text{CaF}_2(\text{Mg}, \text{Mn})$ , LiF
- Cserenkov-számláló (Super-Kamiokande detektor,  $\nu \rightarrow e^-$ ):  $\text{H}_2\text{O}$
- Közös alkatrész: fényelektromos sokszorozó (PMT)

## Szcintillációs $\gamma$ -detektor: „nagy” fotoeffektus, majd sok „pici”



Fotokatód:  
sok kicsi

Dinódák



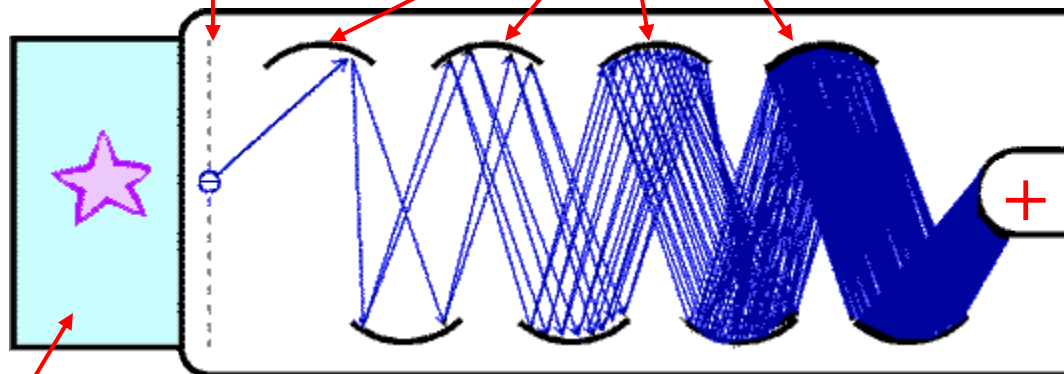
Nem egyesével megy, de...



Egyetlen  $\gamma$  sok „egyidejű” felvillanást okoz. Ezek egy része fotoelektronokat vált ki.

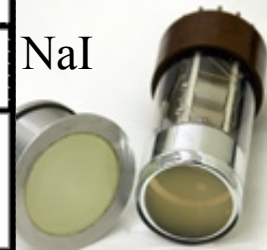


Ezek lavinaszerűen sokszorozódva kigyúlnak az anódon.



NaI

PMT



Szcintillátor, pl. NaI(Tl):  
1 nagy fotoeffektus (vagy CE)

Fényelektromos sokszorozó (PMT: photomultiplier tube)

# Lássuk még egyszer a PMT-t

- hogy fordítva is felismerjük, ha elénk teszik;
- mert ebből *tényleg* látszik, hogy **egyetlen sugárrészecske is rengeteg felvillanást (pár eV energiájú fotonok)** kelt a szcintillátorban, **amiből sok-sok elektron lesz, melyek egyetlen impulzust adnak;**
- és különben is: az animációból sohasem elég
- ...vegyük például ezt:

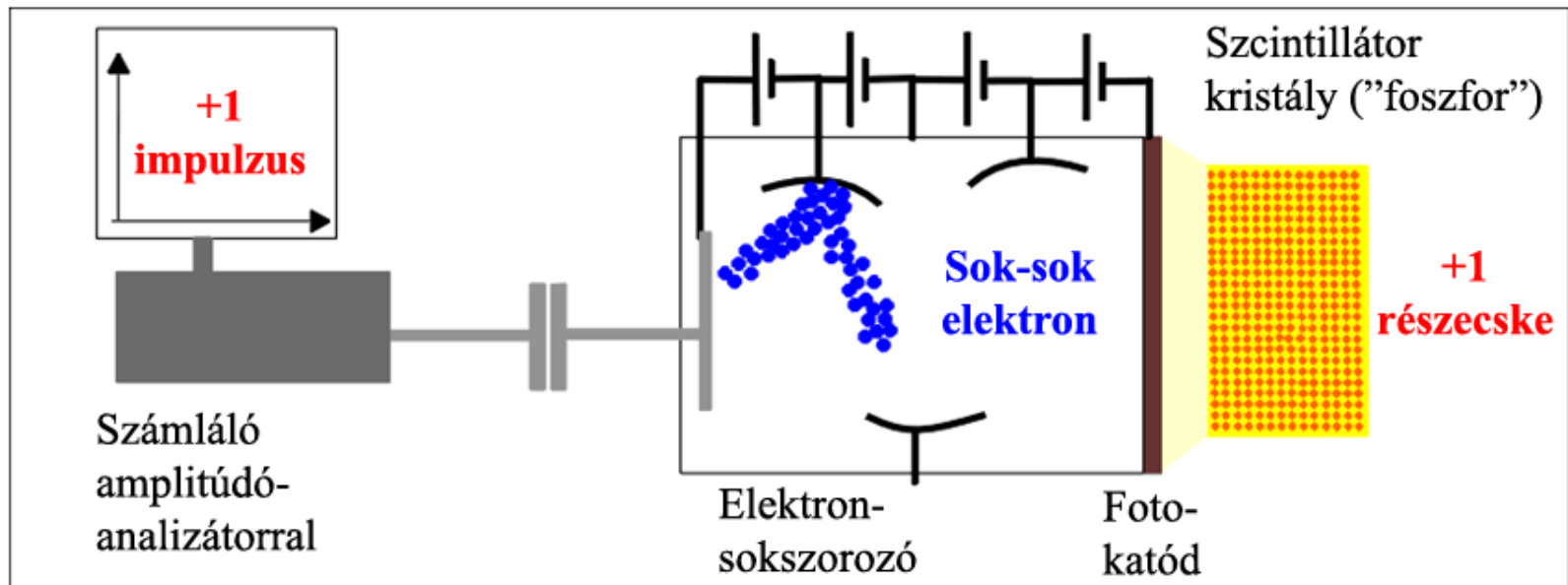


Ha otthon akarjátok megnézni, le kell tölteni a zipet, kicsomagolni, majd elindítani az exét.

Számláló  
amplitúdóanalizátorral

PMT

Szcintillátor  
(„foszfor”)





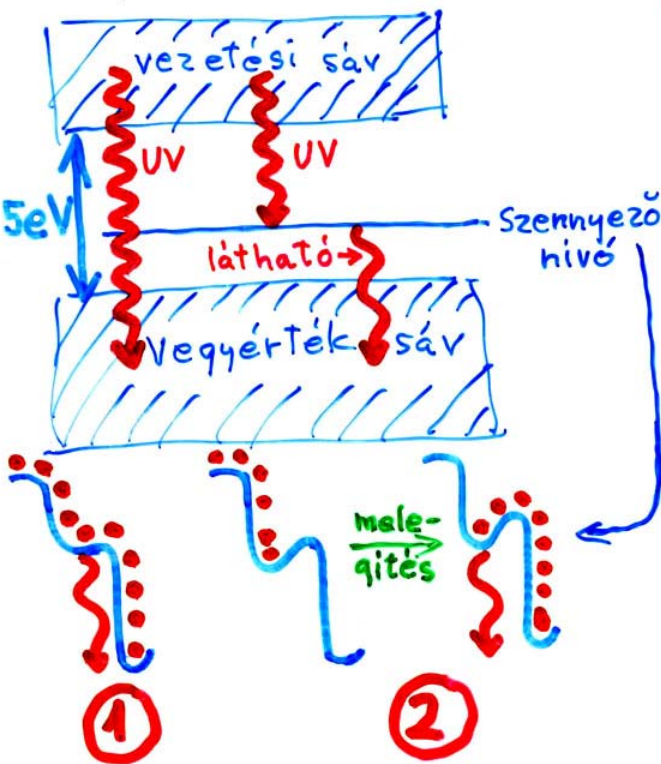
# 1. Szcinti

$\alpha$ : ZnS (Ag)

$\beta$ : zerves, folyadék, plasztik

$\delta$ : NaI (Tl)  $n$ : LiI (Eu)

A szervertlent együtt lehet tárgyalni a **2. TLD**-vel.



4. Ha a szennyezőnivó nem túl mély, akkor spontán fényemisszió köv. be(1). Ha viszont mély, akkor az elektron évezredekig ott maradhat (kormeghatározás), de melegítéssel átsegíthető a küszöbön (2).

Szervertnél probléma, hogy a kibocsátott fény  $\lambda$ -ja nem felel meg (túl nagy) a fotokatód érzékenységi tartományának.



Sok szabadságifokú zerves molekula, amely rosszul gazdálkodik az elnyelt foton energiájával

1. Pl. van egy 0,51 MeV-es annihilációs fotonunk. Fotoeffektus után átkonvertálódik a NaI (Tl) kristályban egy közel ekkora energiájú elektronná

2. Az elektron ionizál stb., míg végül szétszóródik az energiája egy csomó gerjesztésre. Mondjuk durván  $51 \times 10^5 \text{ eV} / 10 \text{ eV} = 5,1 \times 10^4$  elektront emel fel a vezetési sávba.

3. Legerjesztődéskor átlag minden harmadik (tehát  $1,7 \times 10^4$  db) elektront szennyező atom fog be. (Is jön ki a 30 eV/foton.)

## Szcinti és TLD működési elve

• „Foszfor”: az a kristály, amelyben a fény keletkezik

• Szennyező (Tl, Eu), hullámhosszeltoló: ahhoz kell, hogy a sugár részecske által leadott energia látható fény fotonjaivá konvertálódjon, mert a fényelektromos sokszorozó (PMT: photomultiplier tube **W**) fotokatódja **W**, mely a fotont elektronná konvertálja, rendszerint erre a leghatékonyabb.

• Egyetlen sugár részecske (pl.  $\gamma$ -foton) rengeteg gerjesztést hoz létre a foszforban, sok-sok látható fotont, majd fotoelektront keltve.

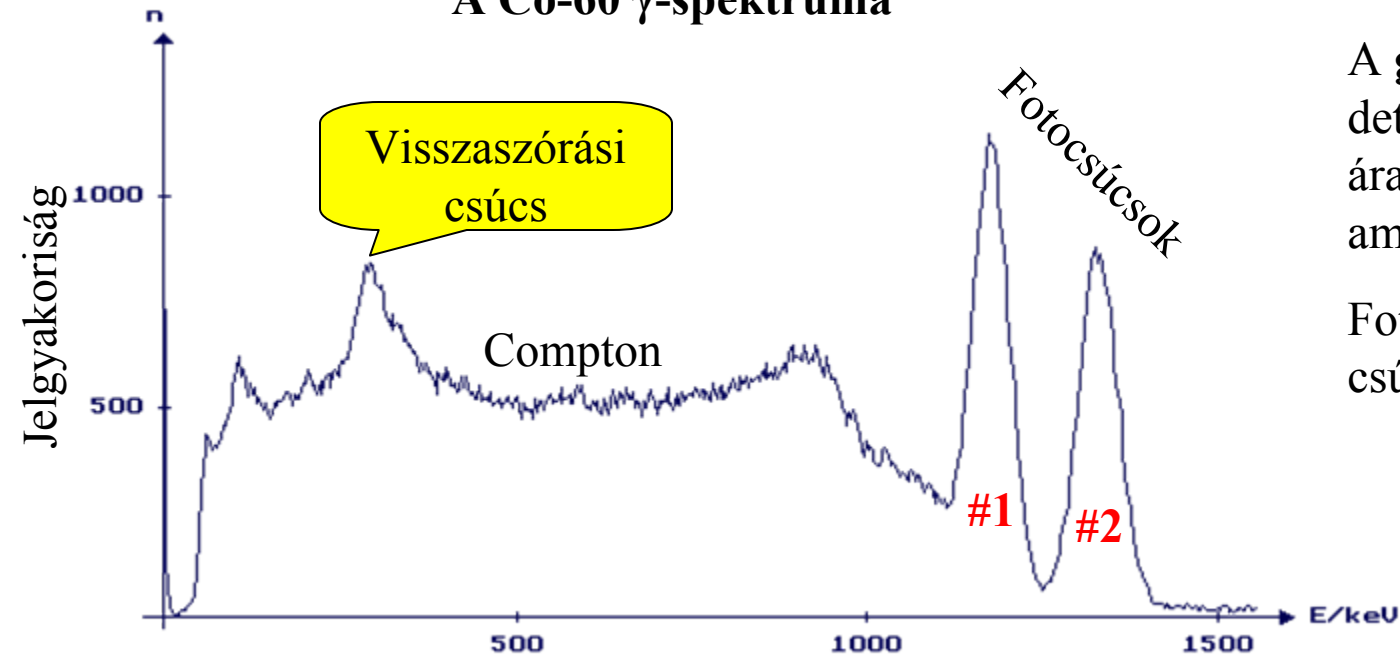


# Gamma-spektroszkópia

A gamma-spektrum a detektorban keletkezett áram/feszültség-impulzusok amplitúdóeloszlása.

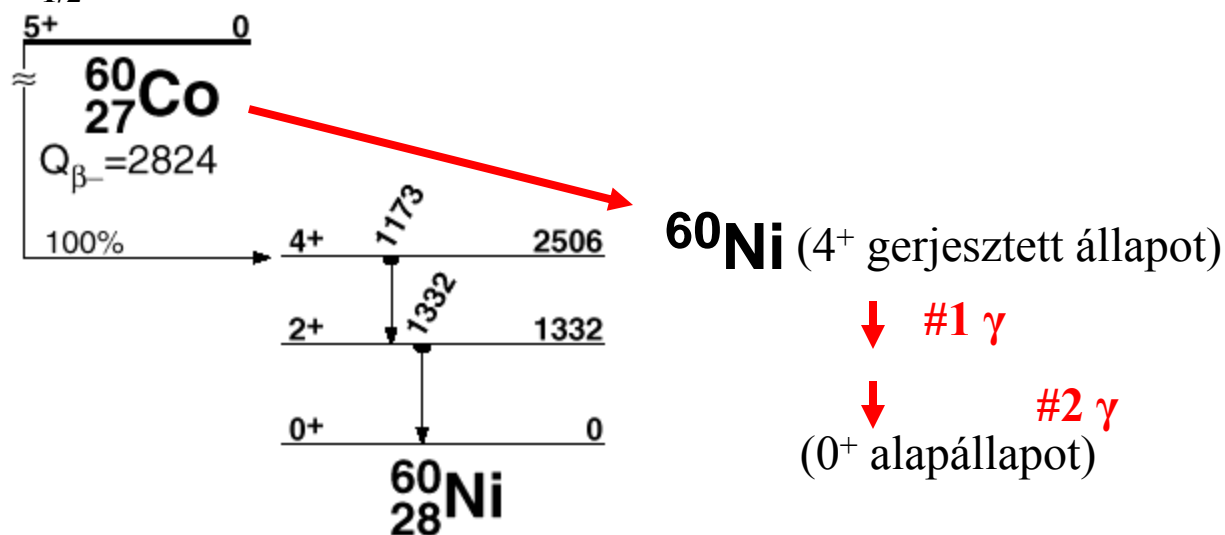
Fotocsúcs  $\equiv$  teljes energiájú csúcs

## A Co-60 $\gamma$ -spektruma

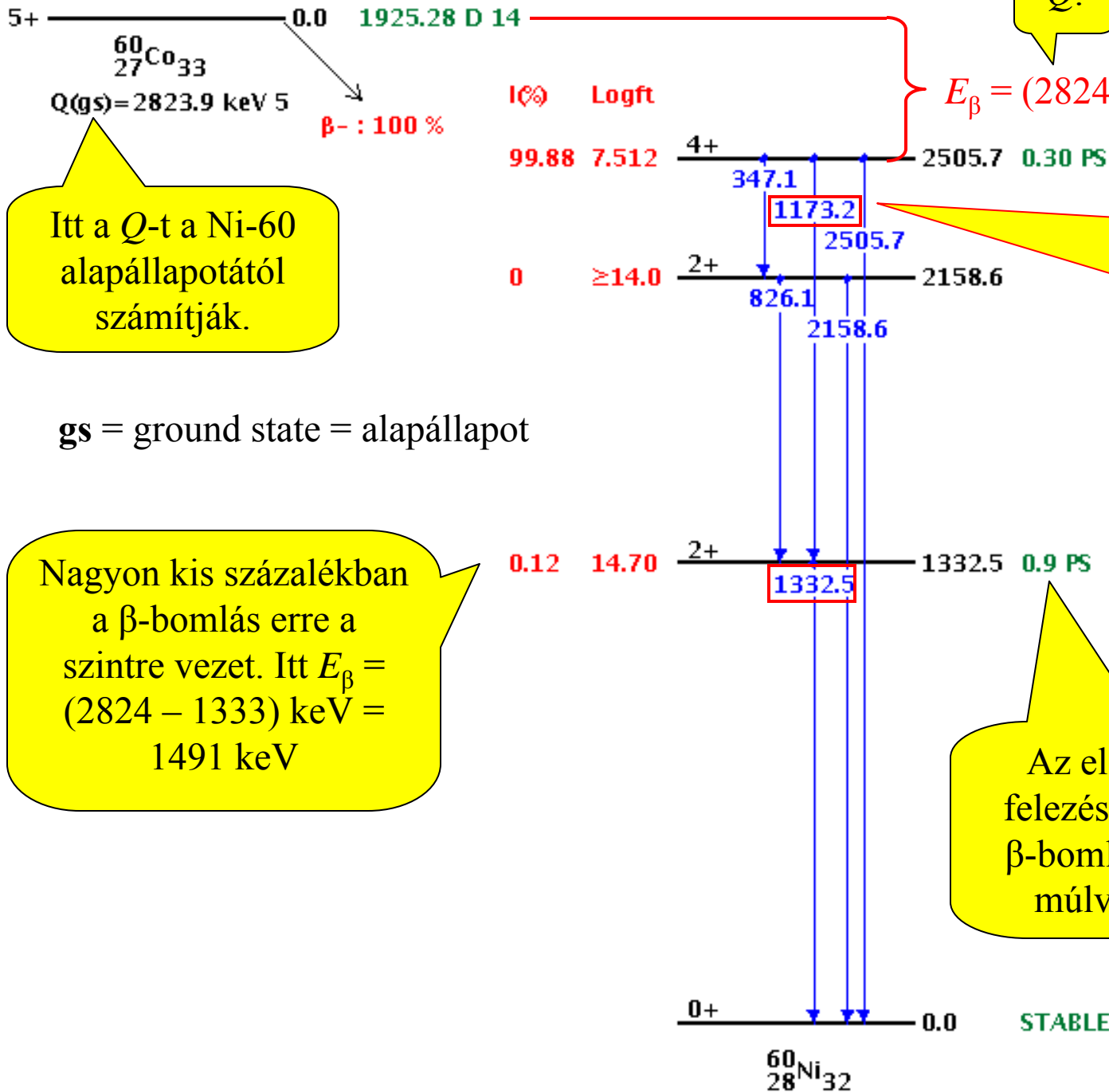


A  $\gamma$ -foton a detektorban hagyott energiával arányos amplitúdójú jelet kelt

$T_{1/2} = 5,25$  év



A teljes bomláséma persze ennél jóval bonyolultabb a következő dia szerint.



$Q.$

$E_\beta = (2824 - 2506) \text{ keV} = 318 \text{ keV}$   
 az esetek 99,88%-ában

Itt a  $Q$ -t a Ni-60 alapállapotától számítják.

gs = ground state = alapállapot

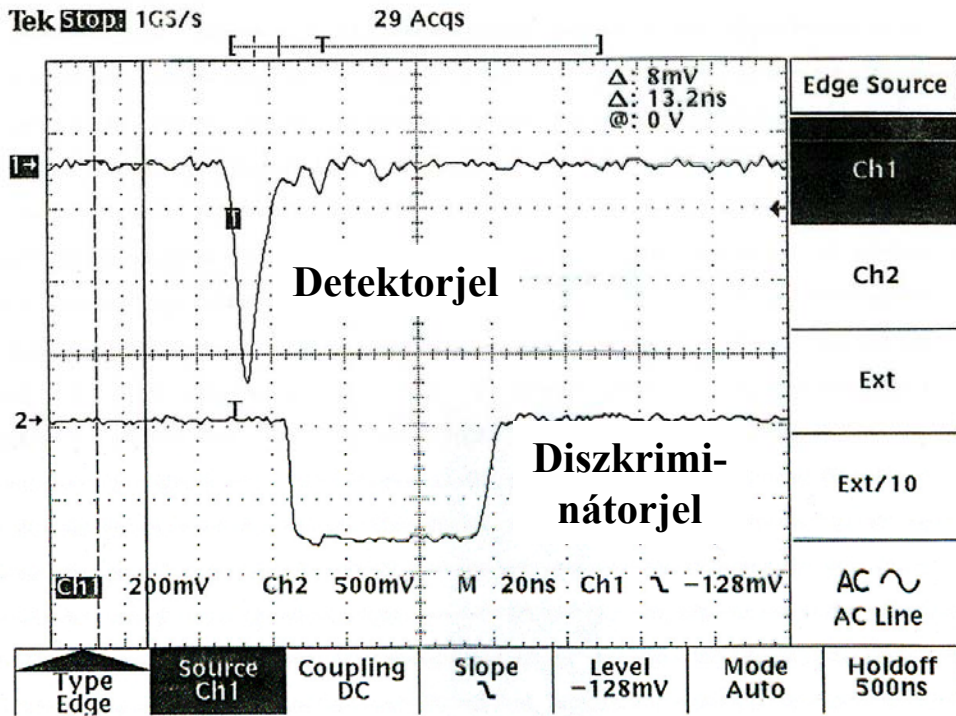
Nagyon kis százalékban a  $\beta$ -bomlás erre a szintre vezet. Itt  $E_\beta = (2824 - 1333) \text{ keV} = 1491 \text{ keV}$

A sok lehetséges  $\gamma$ -átmenet közül a pirossal keretezett kettő a leggyakoribb.

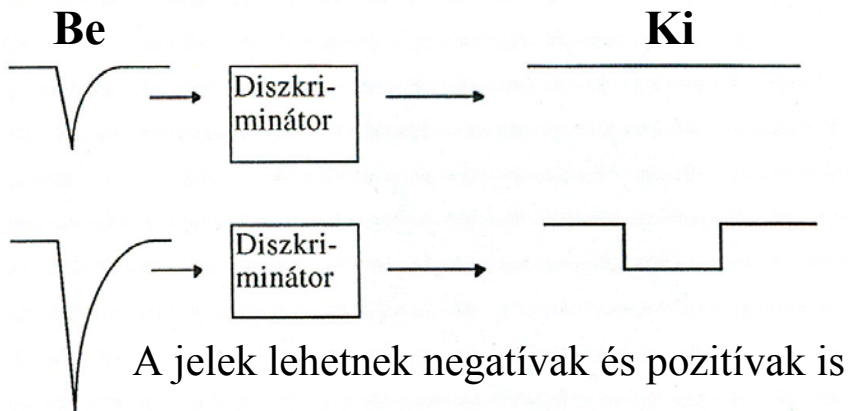
$1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$

Az első foton 0,3 ps felezési idővel követi a  $\beta$ -bomlást, majd 0,9 ps múlva jön a másik.

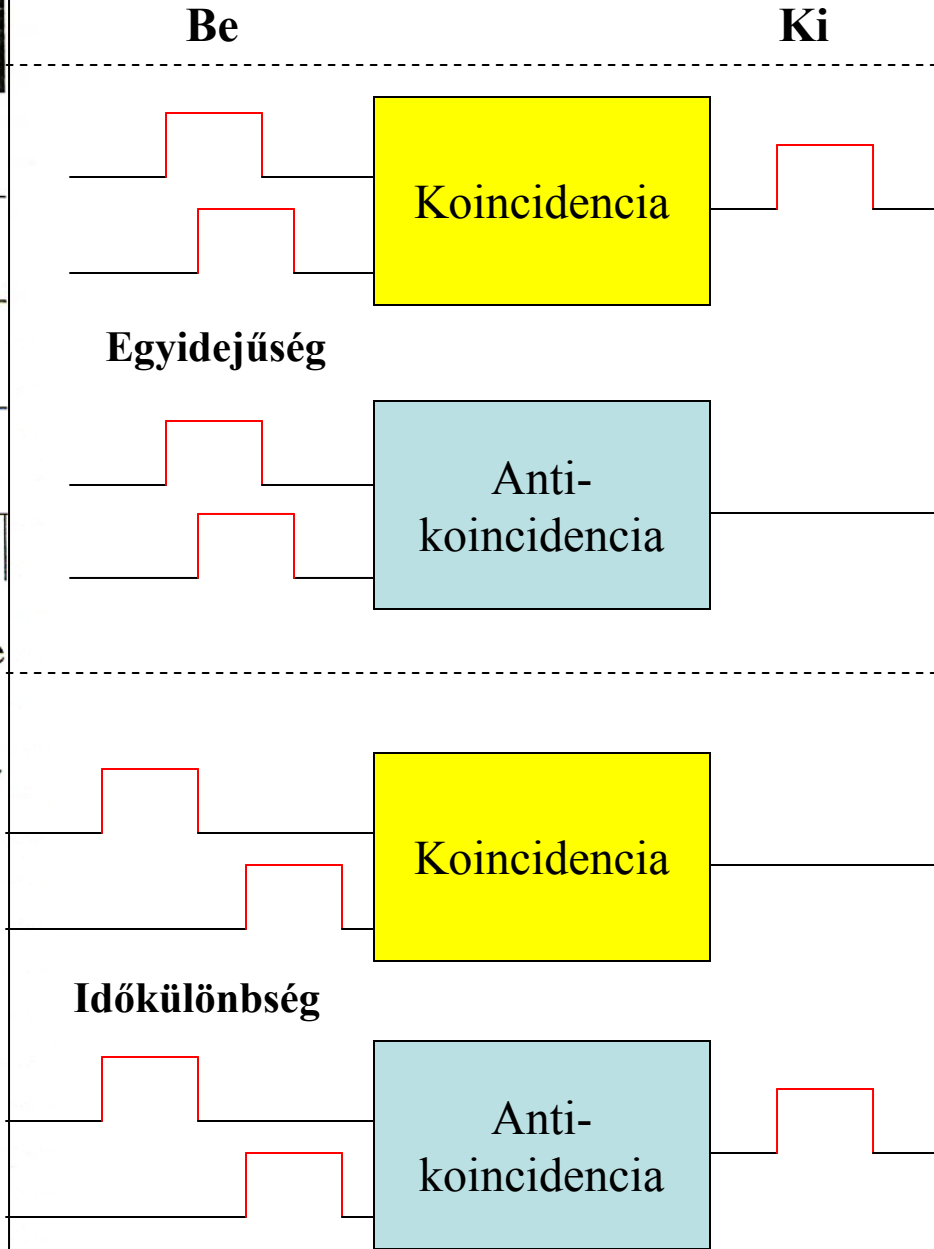


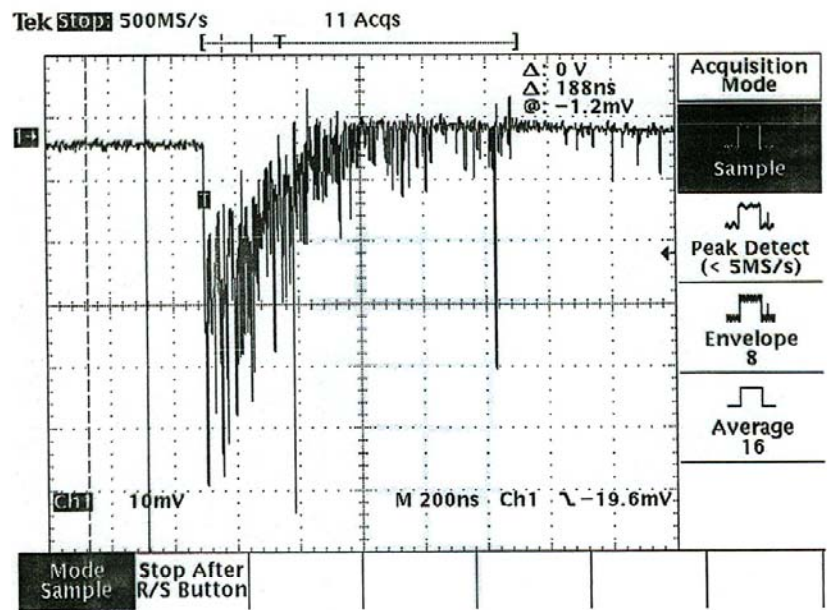
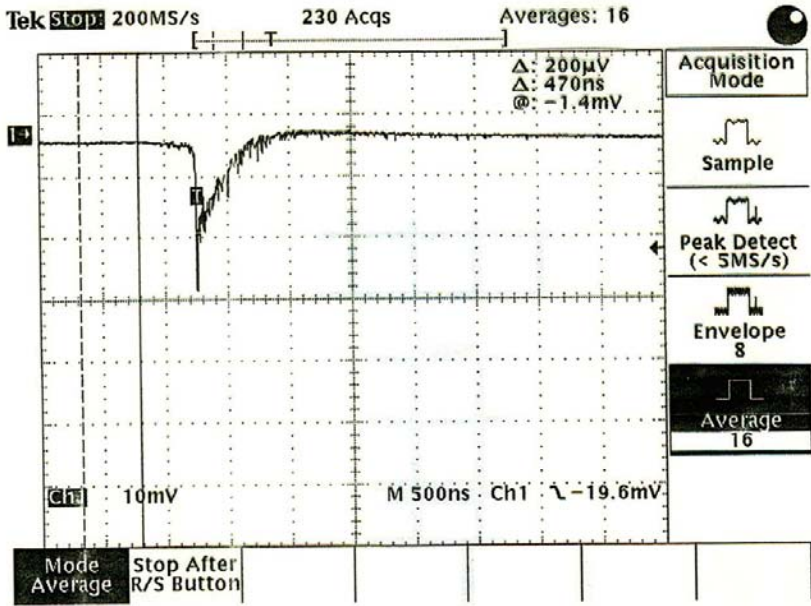


Felső ábra: plasztikszcintillációs detektor energiafüggő jele  
 Alsó ábra: diszkriminátor válaszejele (négyyszögimpulzus).  
 Alább ugyanez sematikusan látható egy "túl kicsi" és egy "megfelelő nagyságú" impulzus esetében. (Vankó György mérései, akárcsak a következő két ábra.)



## Koincidencia & antikoincidencia





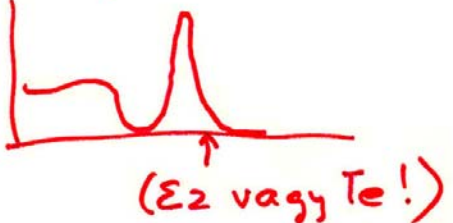
NaI(Tl) szcintillációs detektor jelének globális lefutása egy gamma-foton észlelése után. A teljes görbe alatti (fölötti) terület árulkodik a detektorkristályban elnyelődött összes energiáról. A lecsengés exponenciális, azonos karakterisztikus időparaméterrel, ezért a “háromszög” magassága jellemző lesz a területre és így az energiára. Következésképpen az energiamérés amplitúdóanalízisre vezethető vissza.

Ugyanaz mint az imént, csak hogy a jobb felbontás miatt nem olvadnak (annyira) össze az egyes látható fotonoknak megfelelő elemi áramimpulzusok, amelyek összessége kiad egy detektorjelet. Ugye most már értjük, mi van az exponenciális lecsengés háttérében? (A sok-sok egyszerre keletkező gerjesztett állapot exponenciális bomlása.)

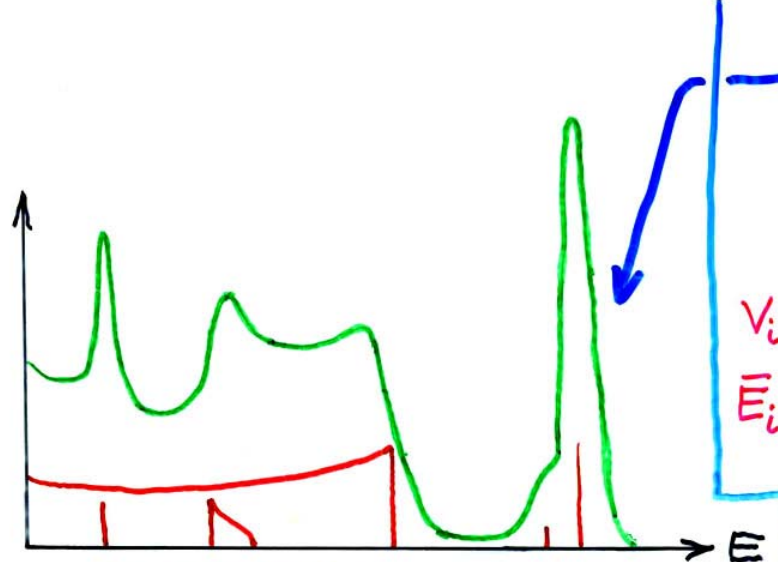
Egy ilyen  $\gamma$  egyetlen pici pontnak felel meg az amplitúdóanalízis vízszintes (ampl./csatorna) tengelyén, mondjuk a fotocsőcsnél:

1 db  $\gamma$ -foton  $\Rightarrow$  1 R látható foton  
 $\uparrow$   
 (R = rakedli)

1db  $\ll R < N_A$







Mi okozza a maszatolódást?

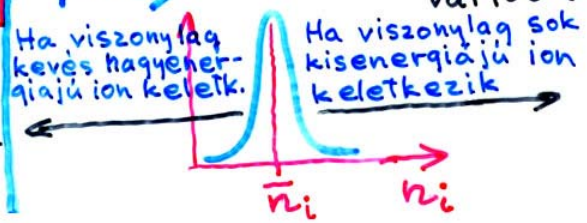
Emlékeztető:

$$\left. \begin{aligned} V_i &= V_{\text{ioniz}} = 15 \text{ eV} \\ \bar{E}_i &= \bar{E}_{\text{ion pár}} = 30 \text{ eV} \end{aligned} \right\} \text{gázban}$$

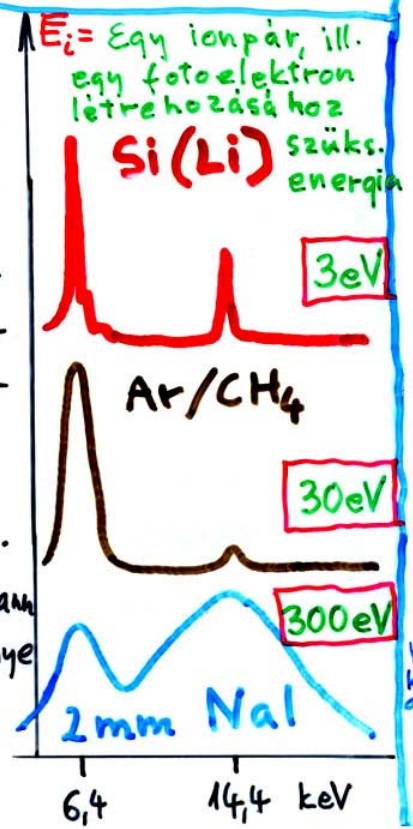
Az energiamezés alapja: megszámolni hány ionpárt hozott létre 1 db sugárreszecske vagy foton. Tudniilliz:

$$\bar{n}_i = \frac{E}{\bar{E}_i} \rightarrow E = \bar{n}_i \bar{E}_i$$

$E$  általában?  $E = \sum n_i E_i$   
 ez az ami állandó  
 ezek viszont együtt változnak



Nyilván mennél nagyobb  $\bar{E}_i$  (illetve mennél kisebb  $\bar{n}_i$ ) az adott detektorfajtára, annál gyakoribbak a szélsőséges energiakiosztások, tehát annál elmosódottabbak lesznek a csúcsok. (Gondoljunk a Boltzmann statisztikában érvényesülő nagy számú törvényére.)



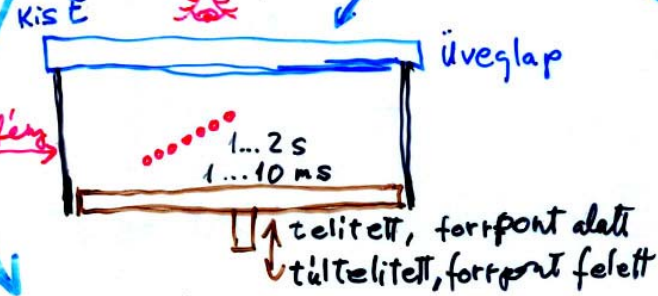
**Energiaszelektív detektorok összehasonlítása**

•**Energiafelbontás**  
 Mint egy digitális kép: minél kevesebb pixel, annál homályosabb a kép. Ezért pl.  $\gamma$ -fotonokra: félvezető > proporcionális > scintillációs detektor

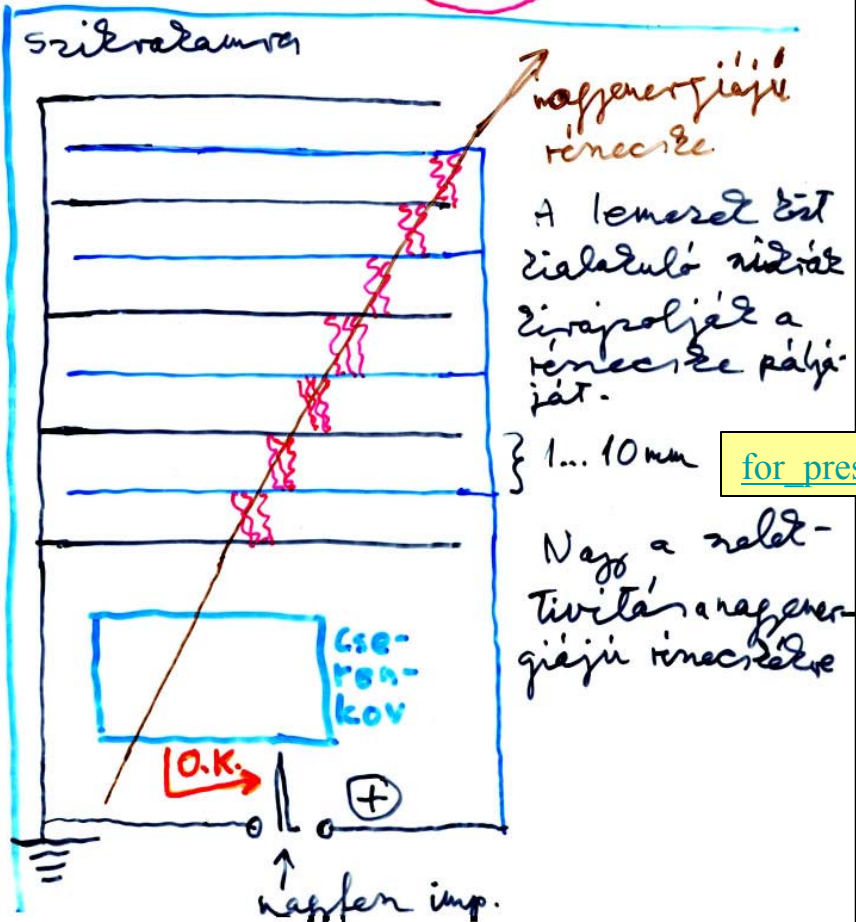
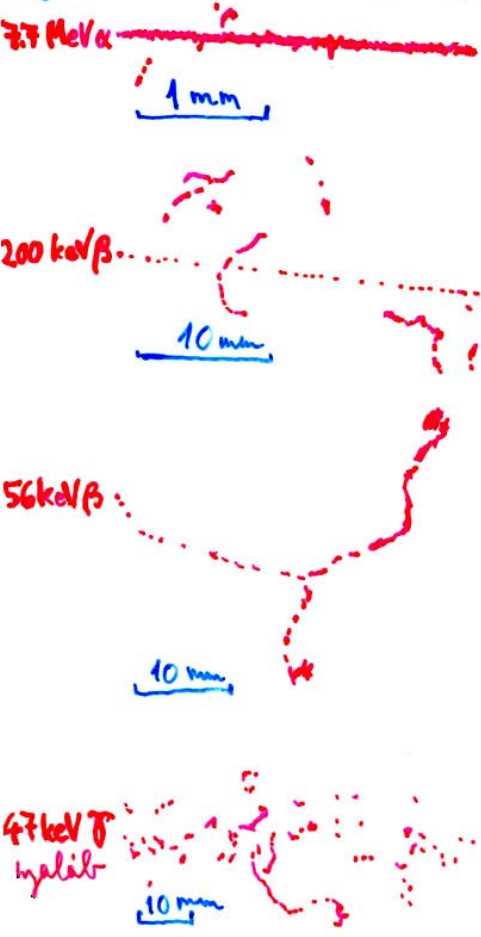
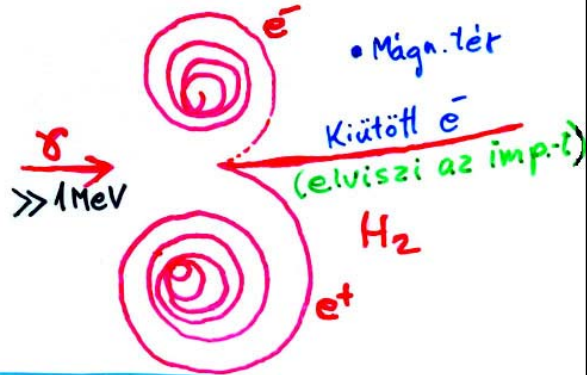
•**Statisztikai háttér:**  
 a „felújítási probléma” nevű sztochasztikus folyamat. Lásd a **Nukleáris mérések és berendezések sztochasztikája** c. elektronikus jegyzetemben.

# Nyomdetektálás

Ködkamra, buborékkamra



Nagy E.



## Nyomdetektálás...

• Expanziós ködkamra (Wilson-kamra) :

Adiabatikus expanzióval túltelített gőzből kondenzcsíkot váltanak ki az ionizáló részecskék.

• Buborékkamra :

túlhevített folyadékból ( $H_2$ ) buborékok válnak ki az ionizáló részecske nyomában

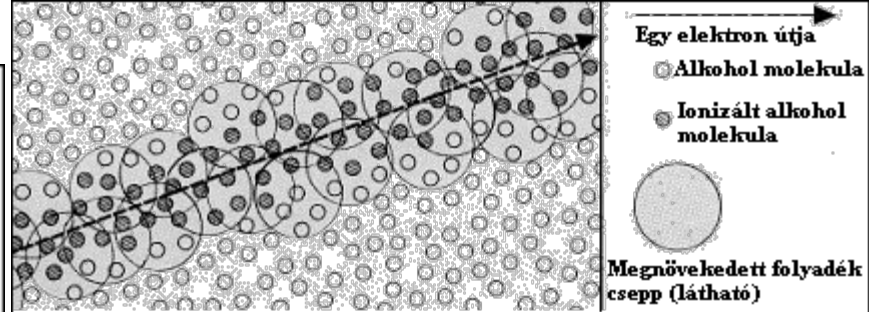
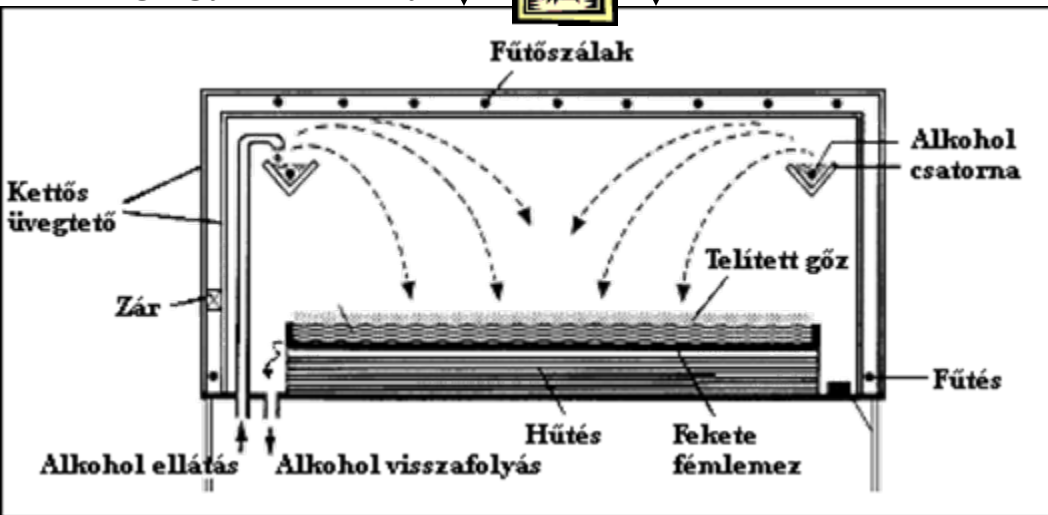
[for\\_present\\_exe/Bubble1.1/Bubble.jar](http://for_present_exe/Bubble1.1/Bubble.jar)

• Szikrakamra :

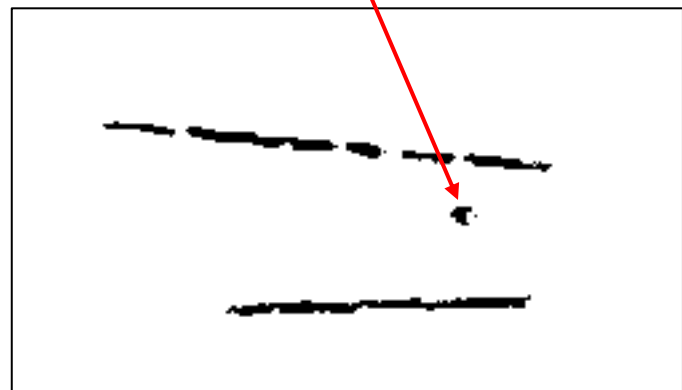
a kellő pillanatban kisüléshatárig feszített elektródok között szikrák jelzik a nagyenergiájú ionizáló részecske nyomvonalát



Megfigyelési irány



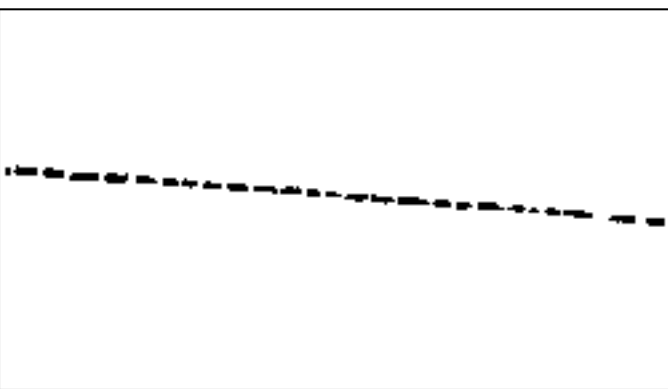
Ennek a protonnak a pályája átdöfte a telített gőzréteget



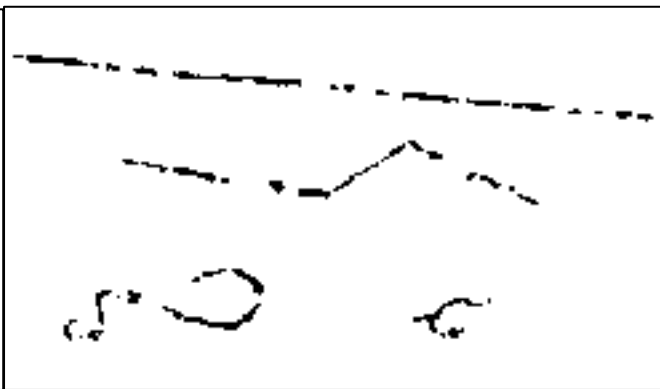
**Protonok**

**Diffúziós ködkamra** szerkezetét és működését ábrázoló rajzok egy [2003-as kiállítás](#) nyomaiból, melyeket a neten detektáltam. A kamra eredetileg fekete háttér előtt fehér nyomokat mutat. (Csak azért invertáltam a felvételeket, hogy ne fogyjon annyi festék a nyomtatáskor :-)

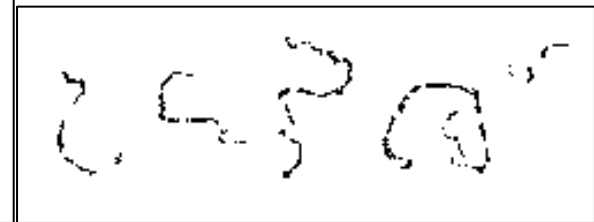
**Elektron, nagy energia**



**Elektronok, kis energia**

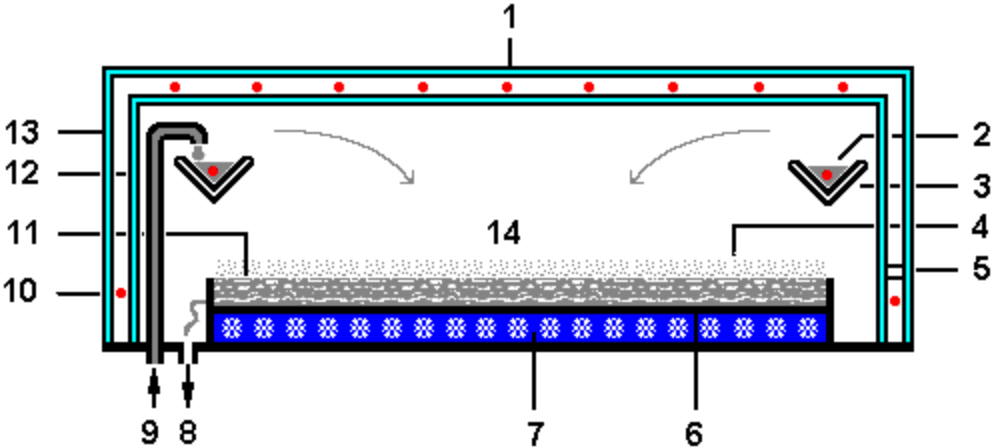


**Elektronok, nagyon kis energia**



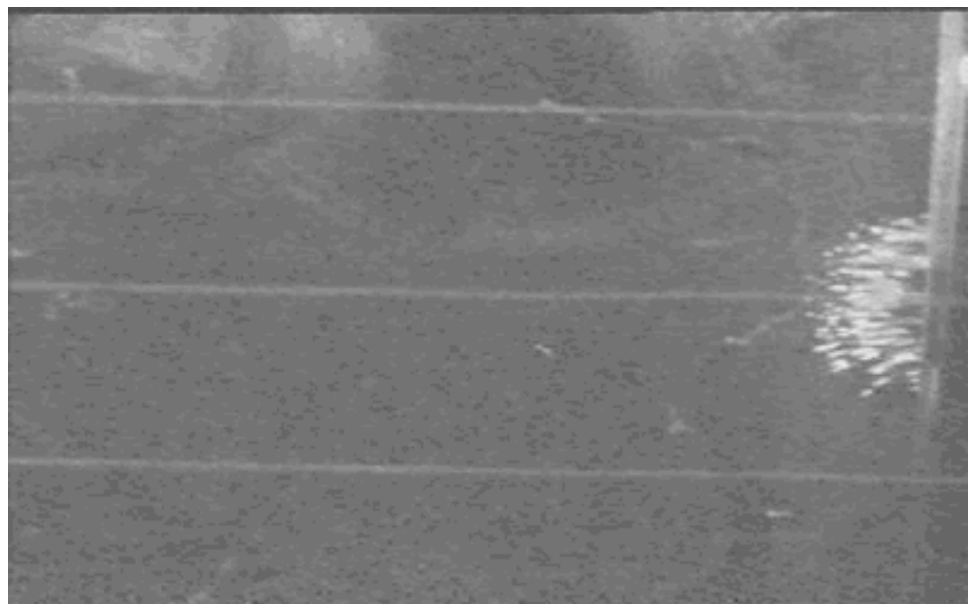
# Minden, ami ezen a dián szerepel innen származik

[Further information on the topic](#)



A diffúziós ködkamra metszete, oldalnézetben,  
a megfigyelő felülről néz a kamrába

A képen Pu-240 forrás (Th(B+C)-vel  
szennyezve) által kibocsátott különböző  
energiájú alfa-részecskék és meglökött szén-  
atommagok, müonok nyomai láthatók



- |                                |                         |
|--------------------------------|-------------------------|
| 1- fűtés, ionkivonás<br>(6 kV) | 7- hűtés                |
| 2- fűtés                       | 8- alkohol-visszafolyás |
| 3- alkoholcsatorna             | 9- alkoholbevitel       |
| 4- túltelített alkoholgőz      | 10- fűtés               |
| 5- nyílás                      | 11- folyadék            |
| forrásbevitelhez               | 12- belső üvegfal       |
| 6- fekete fémlemez             | 13- külső üvegfal       |
|                                | 14- alkoholgőz          |

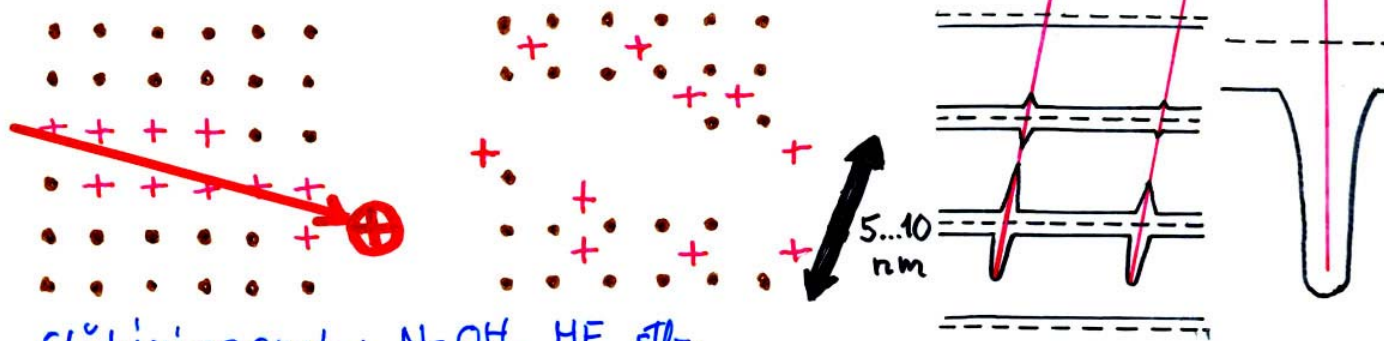
Alkohol: izopropanol

**Kivéve ezt:** ThB  $\equiv$   $^{212}\text{Pb}$ , ThC  $\equiv$   $^{212}\text{Bi}$  ( $4n$  sor)



Fotográfiai módszer: magemulzió. 100... 600 nm szemcserénél.  
 Doziméternél is használják őket.

Szilárdtest nyomdetektorok (szigetelők: szillám, olivin, kvarc,  
 cellulóz-nitrát, cellulóz-acetát, polikarbonát  $A \geq 4$   $\rightarrow A \geq 30$   
 Lexan  $A \geq 12$ )



Előhívószerrek: NaOH, HF stb.



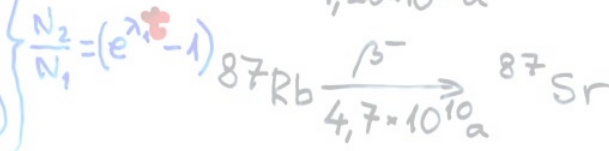
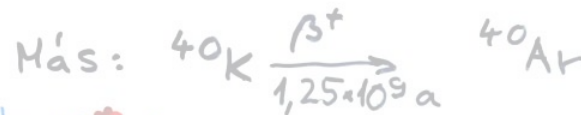
Alkalmazás: hasadási hatás keresztmetszet  
 kormeghatározás

## Geológiai kormeghatározás

Alapelv (1. módszer)



①: túl gyorsan } bomlik  
 ⑤: túl lassan }  
 ②-③-④ megfelelő  $T_{1/2} = 10^8 \dots 10^{10}$  a



Pl.:  
 $4n: 232Th$   
 $4n+2: 238U$   
 $4n+3: 235U$

$\downarrow$   
 76-77.  
 fólia

## Nyomdetektálás...

**Magemulzió:**

AgBr-szemcsékkel működik, mint a közönséges fotográfiai film. A mikroszkóppal lemért nyomhosszból következtetni lehet pl. a-részecskék energiájára.

• **Szilárdtest nyomdetektor:**

Coulomb-robbanás miatt „étevéssel” előhívható rácshibák sorozata jelzi a nehézion útját



# Neutrondetektálás

Aktivációs módszer:  $(n, \gamma)$  reakció Au, In, G céltárgy  
A létrejött radioaktivitás aránya a termikus neutron fluxussal  
Az epitermikus (rezonancia) neutronok hatását pl Cd  
táblával lehet mérni (a Cd elnyeli a termikus neutronokat).  
Gyors neutronokat aktiválási energiát igénylő  $(n, p)$ ,  
 $(n, \alpha)$  reakciók alapján lehet mérni. Különböző  
aktiválási energiájú reakciókkal végigjárható az egész  
spektrumtartomány.

1. Ionizációs kamra. Pl termikus neutronokra:  
 $^{10}\text{B}(n, \alpha) ^7\text{Li}$  ( $\text{BF}_3$  gáz vagy B-tartalmú bevonat)

$^{235}\text{U}(n, f)$  (U-tartalmú bevonat)

$^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$  ( $^3\text{He}$  gáz)

Gyors neutronokra: H-tartalmú gáz  $\rightarrow$  n-p ütközés.  
Erősnél a nagy  $\gamma$ -hátteret nem zavar

2. Proporcionális námláló.

Ha Cd-mal elszűrik a termikus neutronokat,  
akkor csak a magasabb kin. energiájú n-akat érzékeli

3. Szcintillációs módszer.

ZnS<sub>2</sub>-hez stb. Évezetnek pl.  
 $^6\text{Li}(n, \alpha)$ ,  $^{10}\text{B}(n, \alpha)$  vegyületet. A  $\gamma$ -hátteret zavar. LiI  
kristályt is lehet használni NaI helyett. Nagy zavar  
kristályokkal n-energia is mérhető a n-p ütközés alapján.

## Neutrondetektálás

- Aktivációs módszer
- Magreakcióval töltött részecskévé konvertáljuk



Pl. neutronradiográfia  
MCP-vel



A neutronok másképp lát(tat)ják a világot,  
mint a többi sugárzás,  
pl. a röntgen. Az  
utóbbiaknak egy H  
pl. nem jelent  
akadályt.





4. Félvezető detektorok.

Itt a félvezető felületét vonják be  $^{235}\text{U}$ ,  $^6\text{Li}$ ... vegyülettel.

5. Nyomdetektorok

B v. Li vegyülettel átítetett fotoemulzió.  
 $^{235}\text{U}$ -vel bevont csiklém stb.

6. Kémiai & fizikai módszerek

A víz radiolízise  $^{10}\text{B}$  tartalmú oldatokban.  
 $\text{H}_2$ -fejlődés vizsgálhatóan.

Termolumineszcencia (LiF-kristályok v.  
 $^{10}\text{B}$ -vel bevont  $\text{CaF}_2$  kristályok já TL-D-ek)

Bőrtartalmú üvegek elszíneződése is  
 ↑ alkalmas n-meghatározásra.

↓  
 nem bor