

A RADIOAKTÍV SUGÁRZÁS DETEKTÁLÁSA

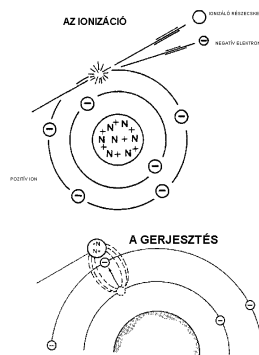
A radioaktív sugárzások detektálása az egyik legérzékenyebb detektálási módszer, mert már az egyes atommagok bomlása is kimutatható. Közvetlenül csak a töltéssel rendelkező részecskék ionizálnak! Számos detektálási módszer ismert. A megfelelő detektálási módszert meghatározza:

- a sugárzás típusa
- a radioaktív minta jellege
- a szükséges detektálási érzékenység.

A detektálás alapja: a sugárzás és a detektor anyagának kölcsönhatása

A kölcsönhatás lehet:

- ionizáció
- gerjesztés



Dr. Pátzay György

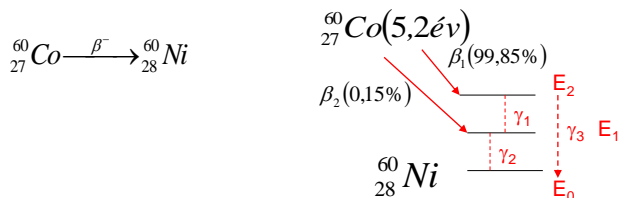
Radiokémia-IV

1

ALAPFOGALMAK

Energia (E):	eV, keV, MeV;	
Aktivitás (A):	Bq, Ci;	$\frac{\text{bomlás}}{\text{idő}}$
Intenzitás (I):	s ⁻¹ ;	$\frac{\text{emittált részecske}}{\text{idő}}$
Részecske fluxus (φ):	cm ⁻² s ⁻¹	$\frac{\text{intenzitás}}{\text{felület}}$
Beütésszám (n):	cps, cpm;	mért intenzitás
Hatáskeresztmetszet (σ):	barn (b)	$10^{-24} \text{ cm}^2 = 1b$

PÉLDA:



$$1 \text{ magbomlás} \xrightarrow{k} 3 \text{ emittált részecske} \xrightarrow{\eta} \eta \cdot 3 \text{ mért részecske}$$

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

2

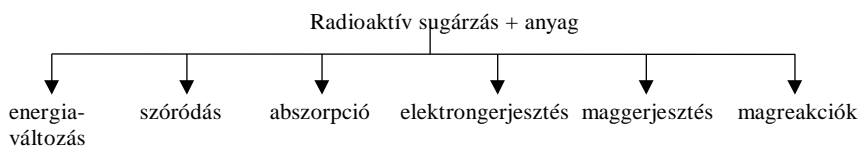
(A)

(I)

(n)

Az anyaggal kölcsönhatásba lépő részecskék

Töltött részecskék		Semleges részecskék	
Nehéz	Könnyű	Nehéz	Könnyű
α	β^-	n	γ
T	β^+		ν
D			
p			



Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

3

Mérőrendszer:

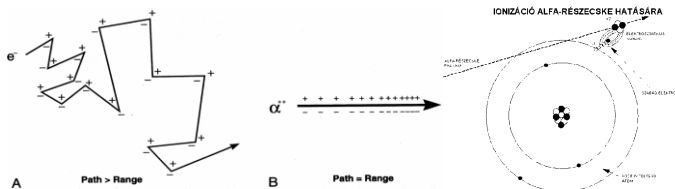
- Detektor
- Mérőberendezés

A detektálás a detektor és a sugárzás kölcsönhatása alapján történik. Ez lehet ionizáció és gerjesztés. Előbbire példa az ionizációs kamra, proporcionális kamra és a Geiger-Müller számlálósó, utóbbira a részben a szcintillációs számláló.

A kölcsönhatás eredménye elehet elektromos tulajdonság megváltozása (pl. elektromos vezetőképesség), kémiai átalakulás, melegedés, magreakció. A sugárzás és a detektor kölcsönhatása általában igen bonyolult.

α -sugárzás (4-10MeV) kölcsönhatása a detektor anyagával

- Ionizáció
- Gerjesztés
- Szóródás



Ionizáció: az α részecskék nagy tömegük következtében alig térülnek el. A fajlagos ionizáció (egységnyi úthosszra eső ionizált atomok száma) csökkenő energiával nő.

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

4

Az α -részecskék kölcsönhatása az anyaggal

A kölcsönhatásban résztvevő anyagrész	A bekövetkezett változás	
	sugárzásban	anyagban
Héjelektron	fékeződés, abszorpció	gerjesztés, ionizáció, kémiai változás
Az atommag erőtere	szóródás, fékeződés, abszorpció	
Az atommag	magreakció	új atommag, kémiai változás

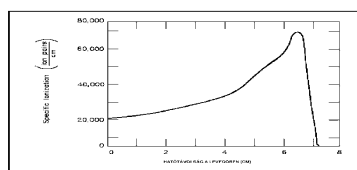
Pl. 5 MeV-os α -részecske hatótávolsága levegőben 3,7 cm, ~40000 töltéspár/cm, szilárd anyagban ~1-2 mikrométer.

Szóródás: ha az α -részecske a mag közelébe jut, nehéz atommagok esetén eléri a 2%-ot. Nagy energiájú α -részecske magreakciót is kiválthat.

β -sugárzás kölcsönhatása a detektor anyagával

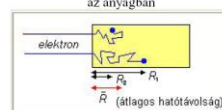
Fajlagos ionizációja kisebb, mint az α -sugárzásé. Kis energiáknál nő a fajlagos ionizáció. A kölcsönhatás lehet:

- Ionizáció
- Gerjesztés, ez a leggyakoribb
- Szóródás
- Annihiláció (β^+ -sugárzás esetén)



A szóródás erőteljesebb mint az α -sugárzásé. Jelentős az ún. visszaszóródás. Fellép ezenkívül a fékezési röntgen sugárzás, melynek energiája (hatótávolsága) a fékező anyag rendszámával nő. 2,2 MeV-os β -sugárzás hatótávolsága levegőben 9 m, ~50 töltéspár/cm.

Az elektronok lefékeződése az anyagban



A béta-részecskék kölcsönhatása az anyaggal

A kölcsönhatásban résztvevő anyagi rész	A bekövetkezett változás	
	a sugárzásban	az anyagban
Héjelektronok	fékeződés, szóródás, abszorpció	gerjesztés, ionizáció, kémiai változás
Az atommag erőtere	fékeződés, szóródás, abszorpció	
Atommag	Nem lépnek kölcsönhatásba	

A röntgen és γ -sugárzás kölcsönhatása a detektor anyagával

A kölcsönhatás a γ -sugárzás energiájától függ.

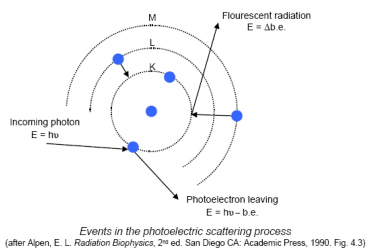
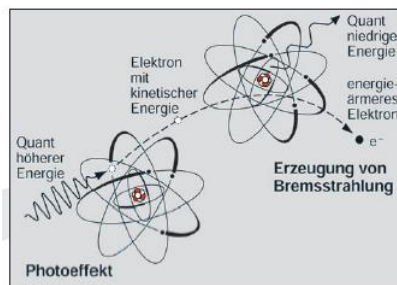
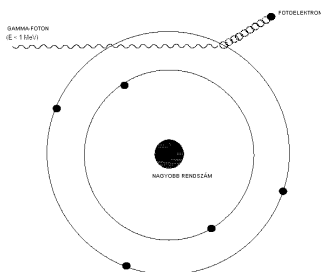
Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

7

- Fotoeffektus ($<1\text{MeV}$)
- Compton-effektus ($>1\text{MeV}$)
- Pároképzés ($>1,02\text{ MeV}$)
- Magreakció (magfotoeffektus)

Fotoeffektus \rightarrow ionizáció (belső elektron)
Karakterisztikus röntgensugárzás kíséri!!



Events in the photoelectric scattering process
(after Alpen, E. L. *Radiation Biophysics*, 2nd ed. San Diego CA: Academic Press, 1990, Fig. 4.3)

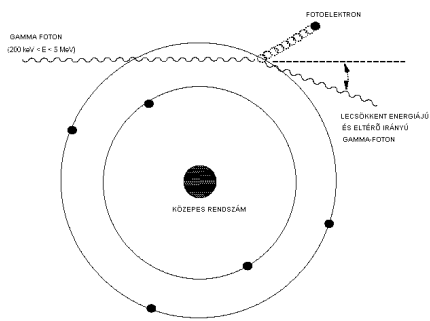
A FOTOEFFEKTUS

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

8

Compton-effektus $\rightarrow \gamma$ kvantum nem semmisül meg, hanem eltérült irányban (szóródás), lecsökkent energiával halad tovább, miközben egy ún. Compton-elektron hagyja el az atomot. A foton energiája a 180° -os szórás esetén csökken a legnagyobb mértékben. Ha a számos Compton-szórás révén a szórt foton energiája elegendően lecsökkent egy fotoeffektus során a kvantum megsemmisül. Ha az összes Compton-elektron és fotoelektron elnyelődik a detektorban a teljesenergia detektálásra kerül, ha a Compton-elektronok egy része kiszökik a detektorból az energiának csak egy része detektálódik.

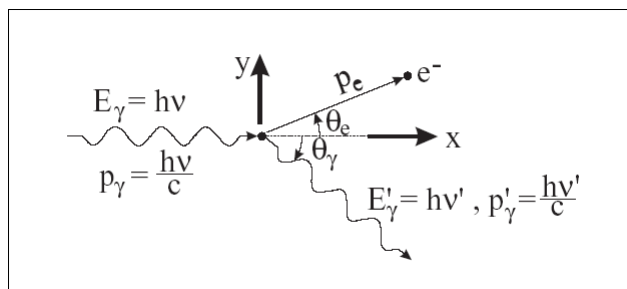


A COMPTON EFFEKTUS

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

9



$$E'_\gamma = \frac{h \cdot \nu}{1 + \frac{h\nu}{m_e \cdot c^2} (1 - \cos\theta_\gamma)}$$

$$E_{kin}^e = h \cdot \nu \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{h\nu}{m_e \cdot c^2} (1 - \cos\theta_\gamma)} \right) \quad (E_{kin}^e)_{Maximal} = h \cdot \nu \cdot \frac{2 \cdot \varepsilon}{1 + 2\varepsilon}$$

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

10

Binding energy (KeV)

100 KeV incident photon

66 KeV Photoelectron

Characteristic X-ray

0.6 KeV (N→M)

4.4 KeV (M→L)

29 KeV (L→K)

Total 34 KeV

Valence electrons

Compton Electron (E_e)

Incident photon (E₀)

Angle of deflection θ

Scattered Photon (E_{sc})

$\lambda_1 < \lambda_2$

Párkeltés esetén → a nagyenergiájú γ kvantum a nehéz mag közelében megsemmisül és átalakul 1 db negatronná és 1 db pozitronná. Ha mindkét elektron elnyelődik a detektorban a teljesenergiát, ha az egyik kiszökik a teljesenergiánál 0,51 MeV-al kevesebbet, ha mindkettő kiszökik 1,02 MeV-al kevesebb energiát detektálunk. A kiszökő pozitron elektronnal találkozva annihiláció során 2 db 0,51 MeV-os γ kvantum keletkezik.

Dr. Pátzay György Radiokémia-IV 11

A PÁRKÉPZÉS

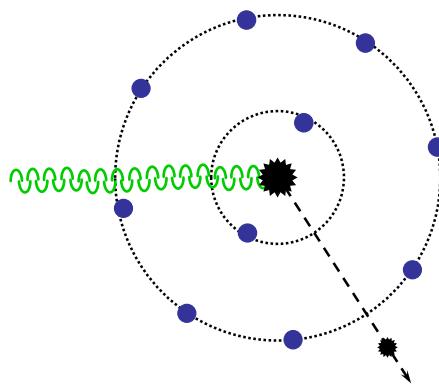
Magreakció → egész nagyenergiájú γ kvantumok magreakciókat indukálhatnak 8 MeV felett (γ, n), (γ, p), ez a magfotoeffektus.

	Rendszámfüggés	Energiafüggés
Fotoeffektus	$\propto Z^4 \dots Z^5$	$\propto E^{-3.5} \dots E^{-1}$
Comptoneffektus	$\propto Z$	$\propto E^{-1}$
Párképzés	$\propto Z^2$	$\propto \ln E$ ($E_\gamma > 1.02$ MeV)

Dr. Pátzay György Radiokémia-IV 12

Magfotoeffektus (Total Abszorpció)

- nagy **foton** energia
 $E_i > 10 \text{ MeV}$
- **A fotont a mag abszorbeálja**
- A magot gerjeszti
 - A mag részecskét bocsát ki és alapállapotba jut



Dr. Pátzay György

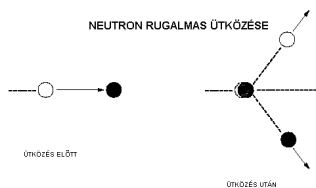
Radiokémia-IV

13

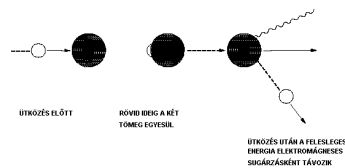
Neutron-sugárzás kölcsönhatása a detektor anyagával

Mivel a neutronnak nincs töltése a maggal lép kölcsönhatásba, mely lehet:

- Rugalmas szóródás
- Rugalmtalan szóródás
- Magreakció



NEUTRON RUGALMAS ÜTKÖZÉSE



NEUTRON RUGALMATLAN ÜTKÖZÉSE

Rugalmas szóródás → a meglökött mag nem gerjesztődik, a neutron energiavesztése a legkönnyebb maggal, a hidrogénnel való ütközés során a legnagyobb.

Rugalmtalan szóródás → a meglökött mag gerjesztődik és a mag energiafelelő γ -sugárzás formájában adja le.

Magreakció → a neutron összeolvad a célmaggal, magreakció játszódik le (n, γ) és a mag az energiafelesleget γ -sugárzás, vagy vegyes sugárzás formájában adja le.

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

14

schnelles Neutron, E_1

Rückstoßkern, E_3

langsames Neutron, E_2

$E_1 = E_2 + E_3$

schnelles Neutron, E_1

langsames Neutron, E_2

Quant

$E_1 > E_2 + E_3$

rad. Zerfall

Dr. Páztay György
Radiokémia-IV
15

Kölcsönhatás az anyaggal

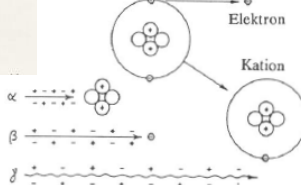
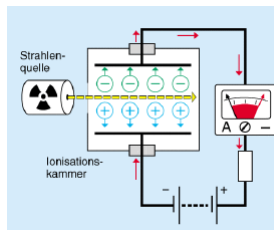
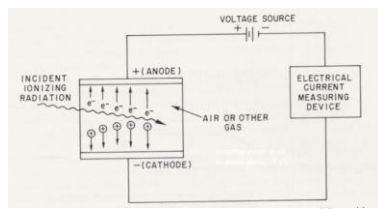
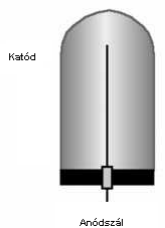
Töltött részecskék (α, β, p)	Semleges részecskék (γ, n)
<p>Folytonos energialeadás (az elektronfelhővel lép kölcsönhatásba kb. 30 eV energiacsökkenés 1 ionizáció során)</p> <p>⇒ maximális hatótávolság</p>	<p>Szakaszos energialeadás (energialeadás ütközéssel, statisztikusan)</p> <p>⇒ nincs hatótávolság határ</p>
<p>dE/dx</p> <p>x</p>	<p>dE/dx</p> <p>x</p>

Dr. Páztay György
16

Gáztöltésű detektorok

Ezek általában argontöltésű detektorok. Az anód a detektor középpontjában helyezkedik el és a számláló teste általában a katód. Az alkalmazott egyenfeszültség függvényében alkalmazzuk az ionizációs kamrákat, a proporcionális számlálókat és a Geiger-Müller (GM) számlálókat.

Általában Ar gázt használnak, mert az elvisel nagy feszültséget ionizáció nélkül, csak gerjesztődik.

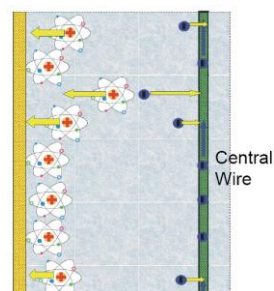
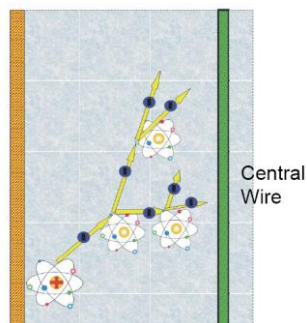
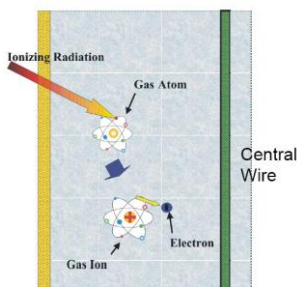


Egy gázionizációs detektor

Dr. Pátzay György

Radiokémia-I

17

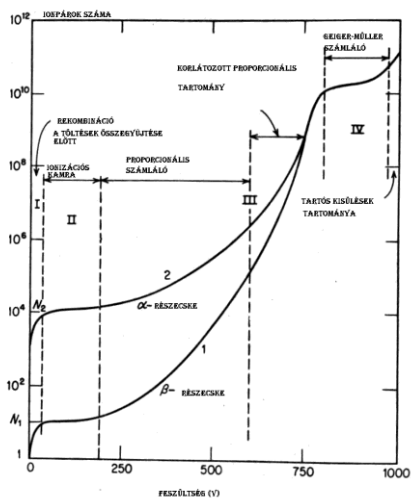


Dr. Pátzay György

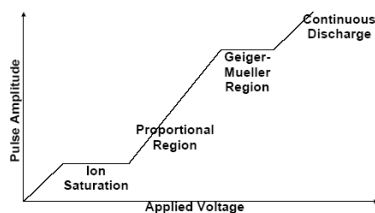
Radiokémia-IV

18

GÁZIONIZÁCIÓS FESZÜLTÉG-IMPULZUS GÖRBE



Alfa- ~100000 töltéspár
Béta ~ 1000 töltéspár



Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

19

1. Az ionizációs számláló tartománya

Az alkalmazott feszültség kicsi (100-300V). Ezen a feszültségen csak az ionizáló sugárzás hatására keletkezett ionpárok (elektronok és pozitív ionok) érik el az elektródákat. Az alfa-sugárzás fajlagos ionizációja magasabb, mint a béta- és gamma-sugárzásé, ezért több töltést produkál. Töltőgáz: levegő (argon)

Alkalmazznak integrális és impulzus üzemi ionizációs kamrák.

Integrális kamra:

- Áramot mérünk, mely α -sugárzás esetén elérheti a μA áramerősséget. Mérése galvanométerrel, 10^{-8} a esetén elektrométerrel vagy nagy ellenálláson eső feszültség mérésével történik.

Impulzus kamra:

- Feszültségimpulzusokat mérünk.

2. A proporcionális számláló tartománya

Az alkalmazott feszültség magasabb (300-3000V). Ezen a feszültségen a megfelelő töltésű elektród felé gyorsulva repülő ionok ütközve más semleges gázatomokkal vagy molekulákkal másodlagos ionizáció révén újabb töltéspárokat hoznak létre. A gázerősítés 10-1000-szeres. Töltőgáz: nevesgáz +10% szeves gőz. A keletkezett összes töltés száma arányos a primer töltések számával, így egy alfa- részecske nagyobb töltésszámot generál, mint a béta-, illetve gamma- "részecskék". Nehéz részek detektálására alkalmas, mert azok teljesen lefekeződnek a detektor térfogatban.

Pl. BF_3 termikus neutronok hatására a következő magreakcióban α -sugárzást generál, mely jelet generál.

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

20

Ionizációs kamra (töltőgáz: pl. Ar)

Végablak
 $\cong 1 \cdot \text{mg}/\text{cm}^2$

Beispiel für die Entstehung eines Ladungsträgerpaares: $\text{N}_2 \rightarrow [\text{N}_2]^+ + \text{e}^-$
(\rightarrow Elektronenflussrichtung)

Dr. Pátzay György 21

$^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$

3. Geiger-Müller (GM) számláló

Az alkalmazott feszültség argontöltés esetén 1000 V fölött van. Ezen a feszültségen a keletkezett elsődleges ionizált töltéspárok gyorsulása olyan nagy, hogy az elsődleges (primer) töltések számától függetlenül azonos nagyságrendű ionizációs "lavina" keletkezik. A gázerősítés 1000000 nagyságrendű. Ez a legérzékenyebb gáztöltésű detektor, de nem képes külön számlálni az alfa-, béta-, vagy gamma-sugárzást. A GM csőnek legnagyobb a holtideje (50-500 μs). Ezalatt az időtartam alatt nem képes a számláló újabb beérkező részecskét számlálni. Különböző GM cső típusokat fejlesztettek ki. Az alapgáz Xe, Ar, a kioltó gáz alkohol vagy Br_2 lehet.

A gamma-sugárzás detektálásához, a kis számlálási hatásfok (kb. 1%) miatt fémből készült teljesen zárt fémhengereket alkalmaznak.

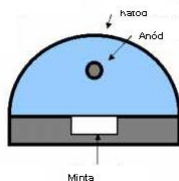
A béta-sugárzás detektálásához az ún. Végablakos GM csövet alkalmazzák. Itt az anódszálat a fémből készült katódhenger veszi körül és a cső végét kis felületi sűrűségű végablakkal zárják le. A végablak csillámlmezéből, vagy vékony műanyag fóliából készült. Az anódszál Ni, Fe, Pt lehet. A béta-sugárzás be tud hatolni a vékony végablakon és a gáztérben ionizációt okoz. Az ilyen csövek hatásfoka béta-sugárzásra közel 100%.

Anódszál vékony végablak
Katód (fémhenger)

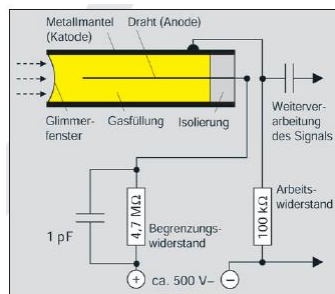
Dr. Pátzay György Radiokémia-IV 22

Az alfa-sugárzás detektálásához még a legvékonyabb végablakos cső sem alkalmas, mert az a nagyenergiás részecskék kivételével alfa-részecskék már a végablakban elnyelődnek. A számlálás megvalósítható, ha a sugárforrást a GM cső belsejében a gáztérben helyezük el. Gáz halmazállapotú alfa-sugárforrás esetén a radioaktív gázt (pl. CO_2 , CH_4 stb.) összekeverjük az argon töltőgázzal és így áramoltatjuk keresztül a csövön. Ez az öblítőgázos megoldás.

Folyékony, vagy szilárd halmazállapotú alfa-sugárzók mérésénél az ún 2π szimmetrikus detektort alkalmazhatjuk. Itt a sugárzó mintát egy vastag falban kialakított üregben helyezük el és erre borítunk egy félgömb alakú burkolatot, melyet lezárás után argon gázzal töltünk meg és az egyen-feszültség bekapcsolása után mérjük az ionizáció mértékét jelző beütésszámot.



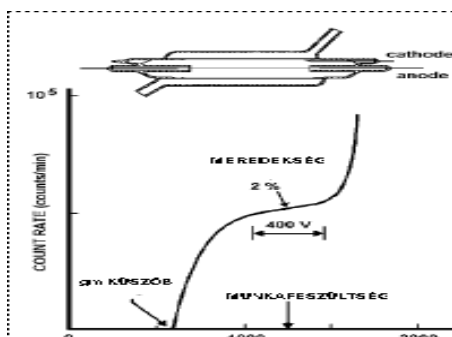
Dr. Pátzay György



Radiokémia-IV

23

A GM cső minősítését és mérési beállítását az ún. karakterisztika görbe alapján végzik el. Ez a feszültség-impulzusszám görbe, melyet egy hosszú élettartamú radionuklid segítségével mérnek meg.



A GM-cső jóságát a plató hosszával és relatív meredekségével(2-10%) jellemezzük. A GM-cső kvantumhatásfoka β -sugárzásra közel 100%, γ -sugárzás esetén $\sim 1\%$.

Holtidő és feloldási idő korlátozza számlálási képességét.

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

24

Holtidő τ

A mért impulzusok száma (I_m) kisebb, mint a valódi impulzusszám (I_v) (holtidőn belül érkező újabb részecskéket nem számolja):

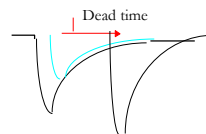
$I_m < I_v \Rightarrow I_v - I_m =$ időegység alatti impulzus veszteség

Ekkor a detektor "halott":

Ez az elveszett idő: $I_m \cdot \tau$

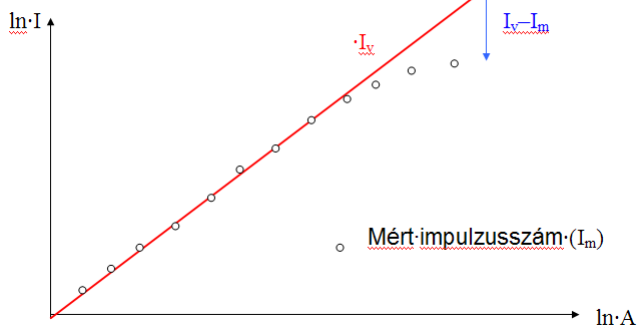
$I_v - I_m = I_v \cdot I_m \cdot \tau$

Dead Time in Pulse Counting



$\tau = (I_v - I_m) / (I_v \cdot I_m)$

τ -meghatározása

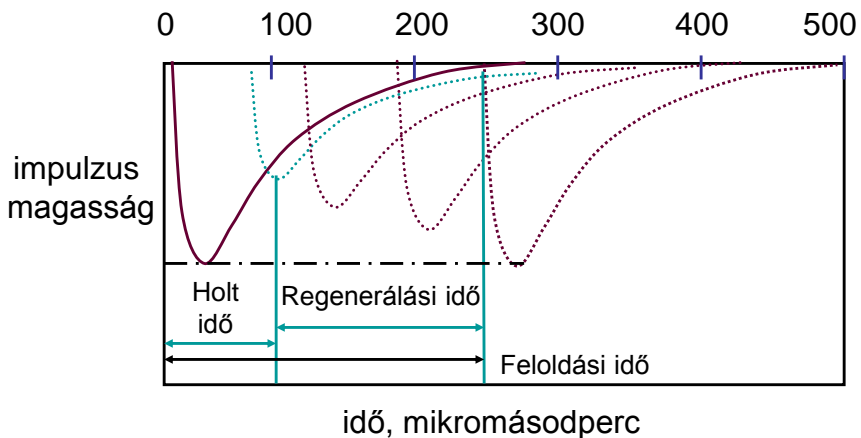


Dr. Páztay György

Radiokémia-IV

25

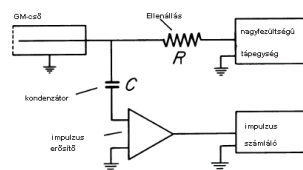
Összefüggés a holtidő, a regenerálási idő és a feloldási idő között



Dr. Páztay György

Radiokémia-IV

26

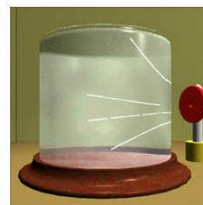


GM-cső kapcsolása

Ködkamra 1911 C.T.R.Wilson

A gázon áthaladó nyomvonal láthatóvá tehető, ha a folyadékcseppek kondenzálódnak az ionizáció során keletkezett ionokon. CO_2 , H_2O és metanol gőzöket használnak. Az α -részecske sűrű ködcspepekből álló ($>1000/\text{cm}$) egyenes vonalakat hoz létre. A β -részecske által létrehozott nyom kevésbé sűrű, néhány csepp/cm. A γ -kvantum nem detektálható.

A kamrát gyakran elektromos, vagy mágneses térbe helyezik a részecskék mozgásmennyiségének a görbülete alapján történő meghatározására



Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

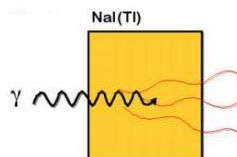
27

Szcintillációs detektorok

A detektor anyagával kölcsönhatásba lépő sugárzás az elektronok gerjesztése révén fény kibocsátását idézi elő.

Előnyei:

- A belépő energiát jó hatásfokkal alakítja fénykvantummá
- Kicsi a holtideje
- Jó a γ -kvantumra vonatkoztatott hatásfoka
- A beérkező fotonokat energia szerint képes számlálni

**SZERVETLEN SZCINTILLÁTOROK (γ , n, α , p)**

- ZnS(Ag) α, β sugárzás hatására látható fényfelvillanás keletkezik
- NaI(Tl) γ -sugárzás detektálására használják, a jó elektronjainak gerjesztése révén sugároz ki fényt, 200 eV energia kell egy foton keltéséhez, A FOTONOK SZÁMA ARÁNYOS A γ -KVANTUM ENERGIÁJÁVAL
- CsI, LiI(Eu), α és β szerves foszforok

SZERVES SZCINTILLÁTOROK (α , β , n, p)

- Antracén
- PPO, POPOP (1,4-feniloxazol-benzol)

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

28

A SZINTILLÁCIÓS MÉRÉS

FOTOLEKTRON SOKSZOROZÓ

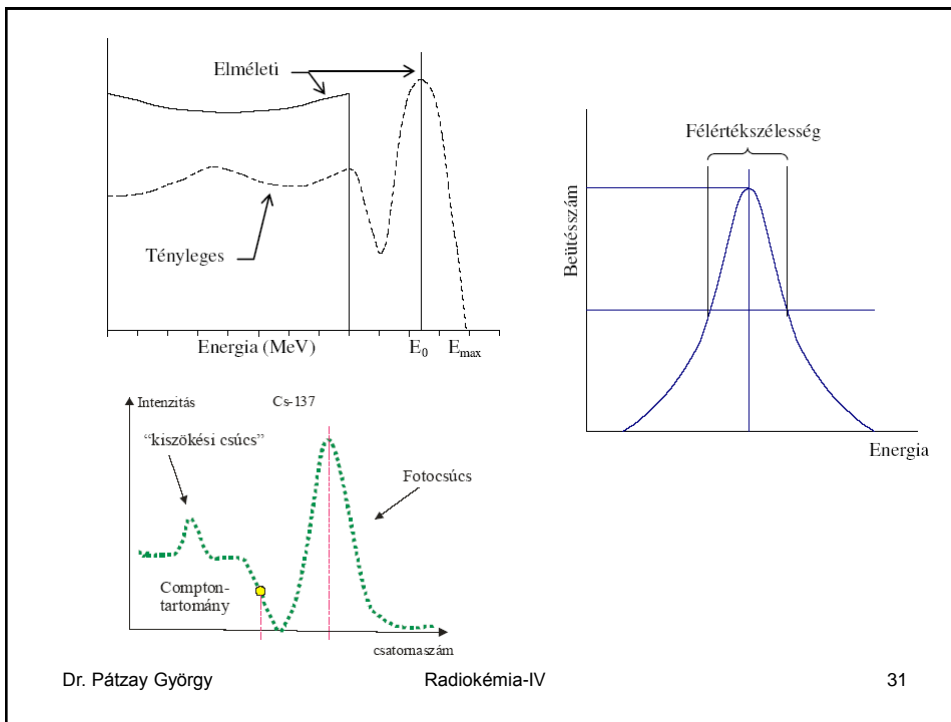
A scintillációs kristályt és a fotoelektron sokszorozót optikailag illesztik. A kristályt alumínium tokban helyezik el a nedvesség, a fény és a szennyeződés kizárására. Az alumínium burkolat belül fényvisszaverő. A kristályokat méreteik szerint (vastagság x átmérő) osztályozzák (2x2-től 5x5-ig).

Nagyobb kristályba több foton nyelődik el.

Dr. Páztay György
Radiokémia-IV
29

A scintillációs detektor jelpulzusai és a spektrum

Dr. Páztay György
Radiokémia-IV
30



Fotokatód: SbCsO , SbNaKC s tartalmú katódok. A szcintillációs kristályt és a fotoelektron sokszorozót optikailag illesztik (szilikon olaj).

The schematic shows a photomultiplier tube with layers: FÉNYZÁRÓ TOK, KATÓD KRISTÁLY, FOM KRISTÁLY BURKOLAT, KRISTÁLYABLAK (UVSG), SZILIKON OLAJ, FOTOKATÓD, FÉNYZÁRÓ TOK, DÍNÓDÁK, ELEKTRON NYALÁB, and ANÓD. The NaI(Tl) detector is shown as a yellow cylinder with a central hole.

Lyukkristály

The spectrum shows a peak at 662 keV. The y-axis is 'cpm' and the x-axis is 'Cs-137'.

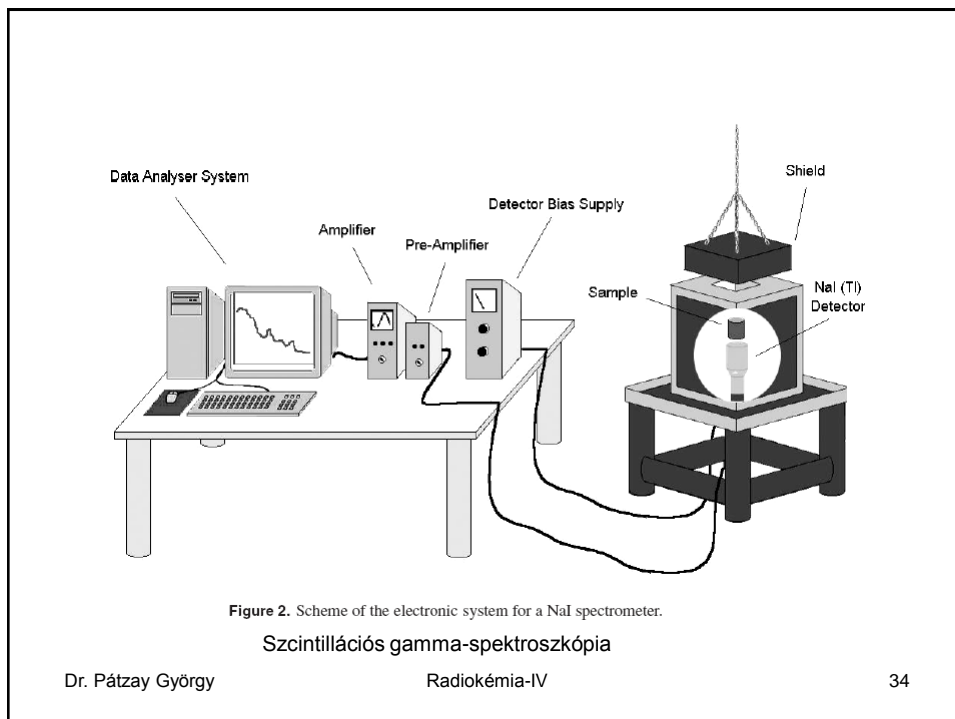
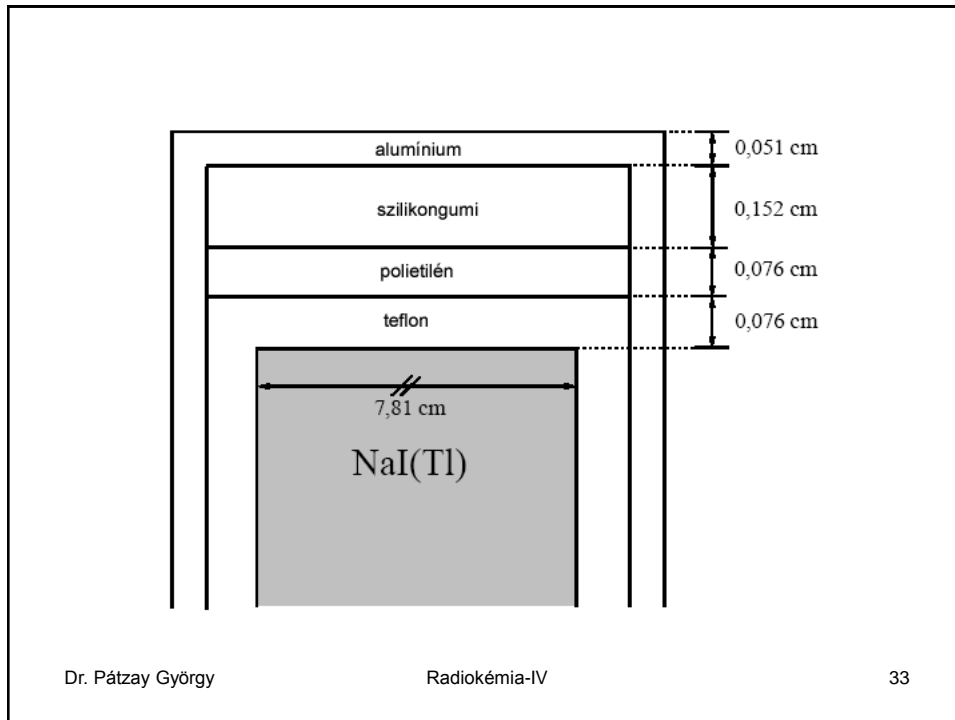
Az ún. lyukkristályok nagyobb érzékenységűek, de kisebb a felbontásuk.
 A NaI(Tl) szcintillációs kristályok felbontóképességét a ^{137}Cs izotóppal mért γ -spektrum teljesenergia csúcsának féltérték szélességével (FWHM) jellemzik.

A NaI(Tl) detektorok teljesenergia jele mellett számos zavaró jel jelentkezik: a Compton tartomány, a párképzési csúcsok, a röntgen tartomány, kiszökési és visszaszórási csúcsok.

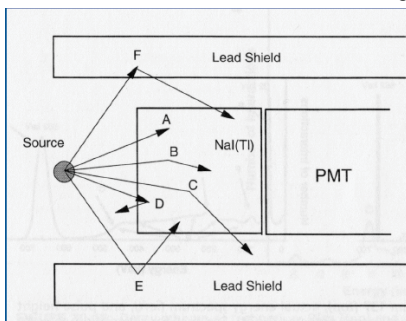
The detailed spectrum shows 'RELATIVE NUMBER OF COUNTS' vs 'ENERGY (keV)'. The peak is at 662 keV. The FWHM is marked as $\Delta E = 46$ keV, which is 7% of the peak energy. Other markers include 'MAXIMUM HEIGHT' and '1/2 MAXIMUM HEIGHT'.

Felbontás(féltérték szélesség)

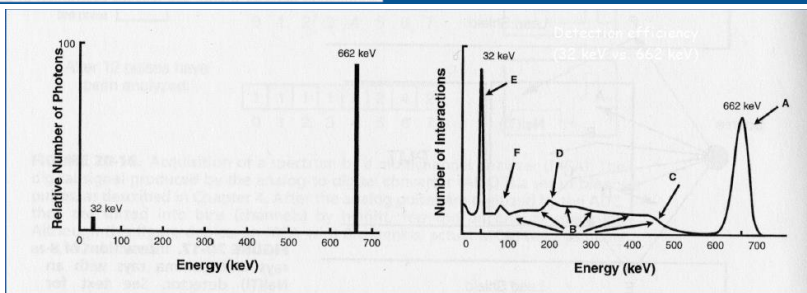
Dr. Páztay György Radiokémia-IV 32



A szcintillációs gamma-spektrum részei



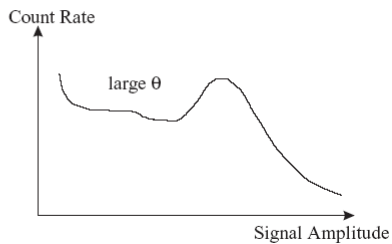
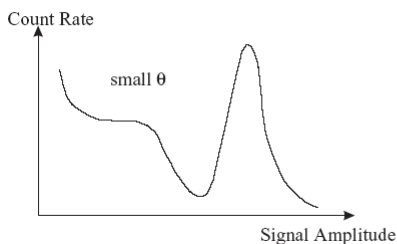
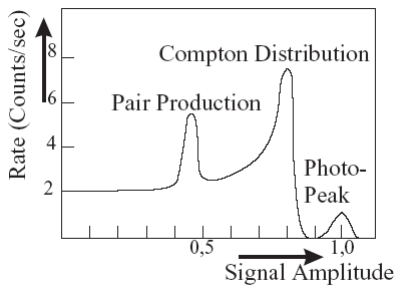
- A. Photoelectric
- B. Compton + Photoelectric
- C. Compton
- D. Photoelectric with characteristic x-ray escape
- E. Compton scattered photon from lead shield
- F. Characteristic x-ray from lead shield



Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

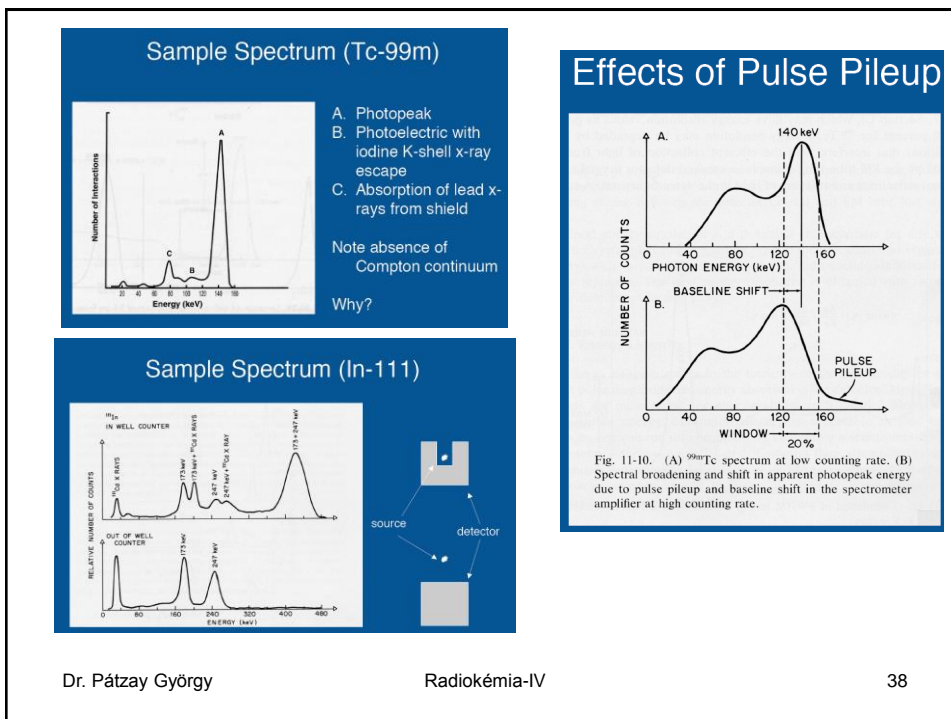
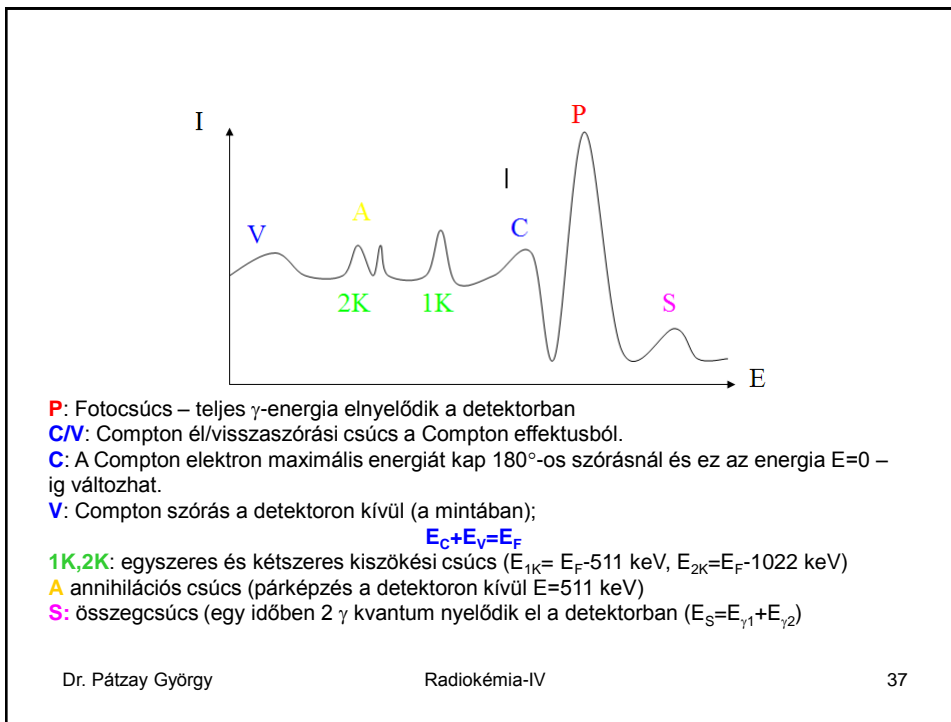
35



Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

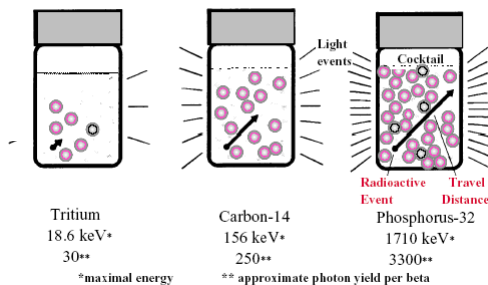
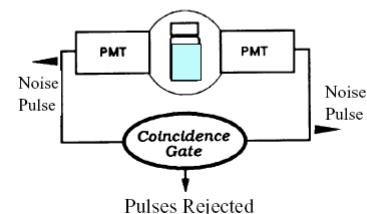
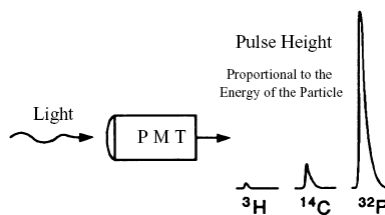
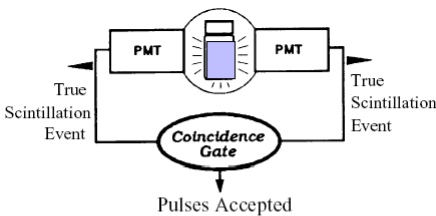
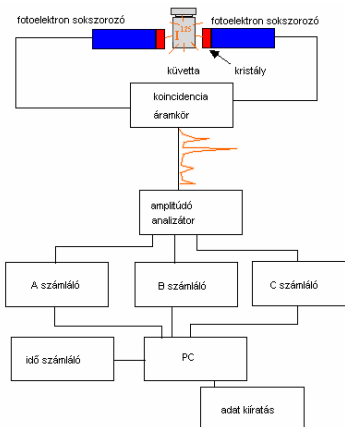
36



FOLYADÉKSZCINTILLÁCIÓ

Alapja, hogy policiklusos vegyületek α , β , vagy neutron sugárzás hatására fényt bocsátanak ki. A lágy (kisenergiájú) β -sugárzás (^{14}C , ^3H) detektálható, ha egy a szcintillációs vegyületet tartalmazó oldatban a sugárforrás is oldottan van jelen (kicsi adszorpció, 4π geometriájú mérés). Számos folyadék alkalmas poláris és apoláris minták oldására. Az átlátszó folyadékot nagyméretű fotoelektron sokszorozókkal körbevéve a fényjelek elektromos jelekké alakíthatók és így 90-100%-os számlálási hatások érhető el. Kisaktivitású minták is mérhetők, pl. biológiai anyagokban szén- és hidrogén-tartalmú vegyületek mennyisége. A ^{14}C és a ^3H különböző energiájú fénypotonokat gerjeszt, így bizonyos megkülönböztetés is megvalósítható.

Kioltás jelensége \rightarrow a színes vegyületek elnyelik a fény egy részét.



Isotope	Radiation	β / e^- Energy E_{max}	Efficiency
^3H	β	18.6 keV	60%
^{14}C	β	156 keV	90%
^{32}P	β	1710 keV	95%
^{35}S	β	160 keV	90%
^{51}Cr	$\gamma - e^-$	5 keV	35%
^{125}I	$\gamma - e^-$	4 & 30 keV	80%

Kioltás:

Kémiai – a kottélban lévő vegyületek elnyelik a radioaktív sugárzás egy részét pl. a CCl_4 elnyeli a béta sugárzás egy részét és infravörös fényt bocsát ki

Foto – a ~3 eV-os kék fénycsók az oldatban lévő színes vegyületek elnyelik

Dr. Pátzay György Radiokémia-IV 41

A kioltás eltolja a spektrumot az alacsonyabb energiák felé és csökkenti a beütésszámot.

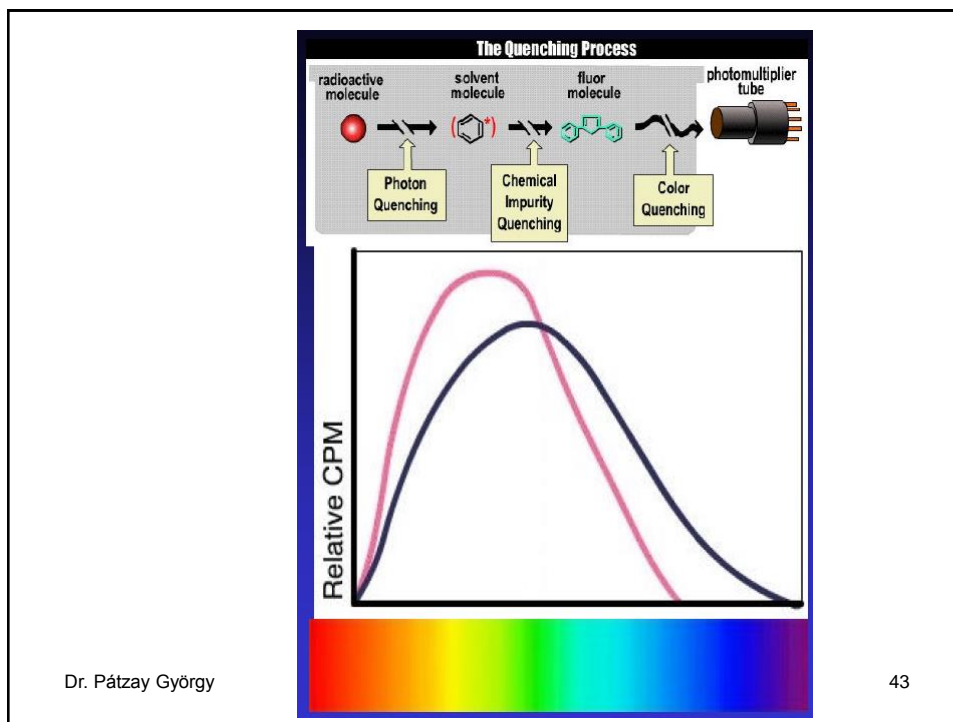
A megfelelő méréshez kioltás mentes mérési eredmények kellenek és a beütésszám-aktivitás átszámításánál a bomlási séma ($dpm = cpm / \text{eff}$) mellett a kioltást is figyelembe kell venni.

A kioltás-hatásfok összefüggés kalibrációval határozható meg. Például 10 kuvettában ugyanannyi radioaktivitás (dpm) van de különböző mennyiségű kioltó (nitro-metán). Minél több a kioltó, annál kisebb a beütésszám (cpm). Megmérve a beütésszámokat a hatások $\text{eff} = cpm / dpm$ mehatározható.

Each vial contains 194,433 dpm -- H-3

Quench # =	518	430	341	279	219	169	123	86.3	45.2	17.9
cpm =	93,172	86,600	75,245	64,668	52,380	39,567	26,909	16,624	5,463	641
eff =	47.9	44.5	38.7	33.3	26.9	20.4	13.8	8.6	2.8	0.3

Dr. Pátzay György Radiokémia-IV 42



Egyes kémiai analitikai módszerek érzékenysége

ANALÍZIS	DETEKTÁLÁSI KÜSZÖB	MEGJEGYZÉS
IR Spektroszkópia	10^{15} molekula	roncsolásmentes
UV Spektroszkópia	10^{15} molekula	roncsolásmentes
Atomadszorpció	10^{13} atom	roncsolásos
Láng emissziós anal.	10^{13} atoms	roncsolásos
Gázkromatográfia	10^{13} atoms	roncsolásos
Radioizotópos		roncsolásmentes
^{14}C	10^{11} atom	(5770 yr felezési idő)
^3H	10^9 atom	(12.26 yr felezési idő)
^{32}P	6×10^6 atom	(14.3 yr felezési idő)

Leggyakrabban β -sugárzó nuklidokat alkalmaznak a folyadékszcintillációs mérésekben: ^3H (0.018 MeV), ^{14}C (0.156 MeV), ^{35}S (0.168 MeV), ^{45}Ca (0.250 MeV), ^{32}P (1.710 MeV), ^{131}I (0.610 MeV).

Az oldószerhez fluoreszkáló anyagot adnak, mely eltolja a gerjesztéskor keletkezett fény hullámhosszát a magasabb hullámhosszak felé.

Oldószer: dioxán, toluol, p-xylol szcintilláló anyag: PPO, dimetil - popopbutil PBO, PBBO

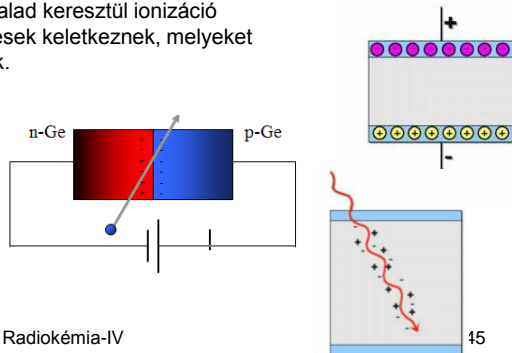
Félvezető detektorok

Egy szilárd-test ionizációs detektor. Si(Li)-detektort röntgen detektáláshoz, Ge(Li)-detektort γ -sugárzás detektálásához alkalmazzák. A lítiumot a félvezetők szennyezőinek ellensúlyozására, a töltések mobilitásának növelésére driftelnek be a detektor anyagába. Lényegében egy olyan ionizációs kamra, melyben a gázt szilárd félvezető réteg helyettesíti.

Ha a kristályra kis feszültség különbséget kapcsolunk pozitív, negatív és töltésszegény zónák jönnek létre. Ez hasonló az np-típusú tranzisztorokhoz. Ge 5 értékű P, As vagy Sb atomokkal szennyezve szabad elektronnal rendelkező n-Ge, 3 értékű B, Ga vagy In atomokkal szennyezve szabad pozitív töltésű lyukkal rendelkező p-Ge jön létre.

Ha a detektoron ionizáló részecske halad keresztül ionizáció következtében pozitív és negatív töltések keletkeznek, melyeket a megfelelő elektródon összegyűjtünk.

A Ge detektoroknál egy töltés létrehozásához csak ~ 2 eV kell, ezért nagyon **nagy felbontás** érhető el. Drága detektorok, térfogatuk nem túl nagy, ezért **érzékenységük kicsi**.



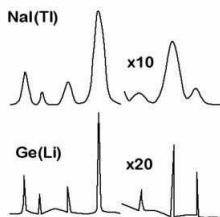
Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

15

A-131 IZOTÓP SZCINTILLÁCIÓS (NaI(Tl)) ÉS FÉLVEZETŐ DETEKTOROS (Ge(Li)) SPEKTRUMA

131I
spectrum

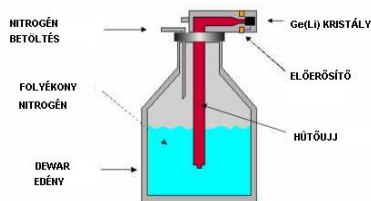


Dr. Pátzay György

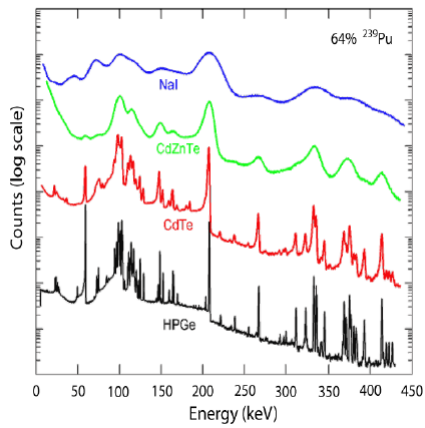
Radiokémia-IV

46

Ge(Li) DETEKTOR



A Ge(Li) detektort hűteni kell folyékony nitrogénnel, mert a Li szobahőfokon visszadiffundál. A HPGE detektorok (nincs Li) nem igényelnek folyamatos hűtést.

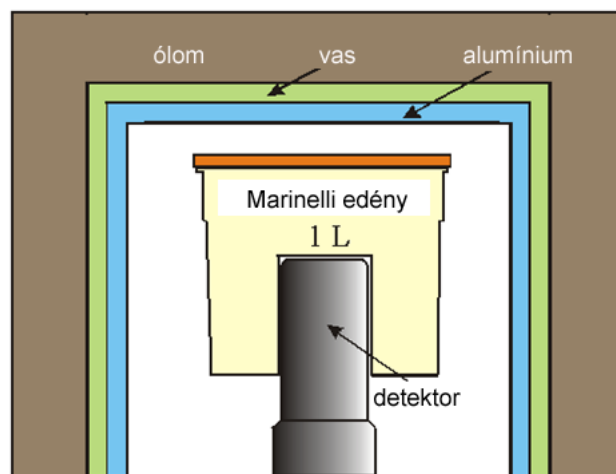


Plutonium-239 gamma-spektruma NaI, CdZnTe, CdTe és HPGe detektorokkal

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

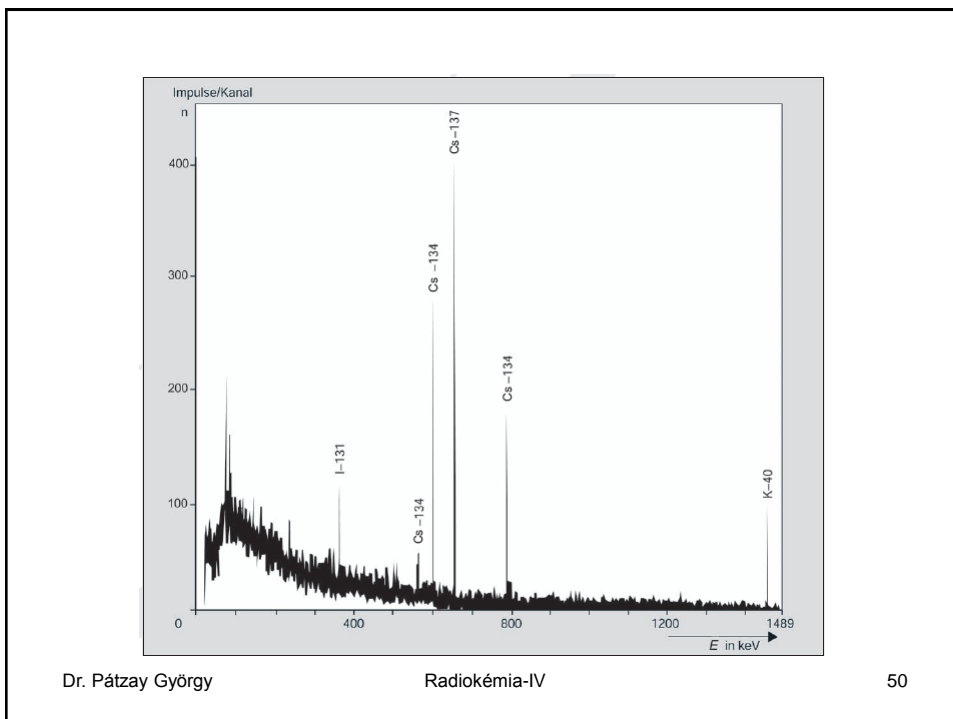
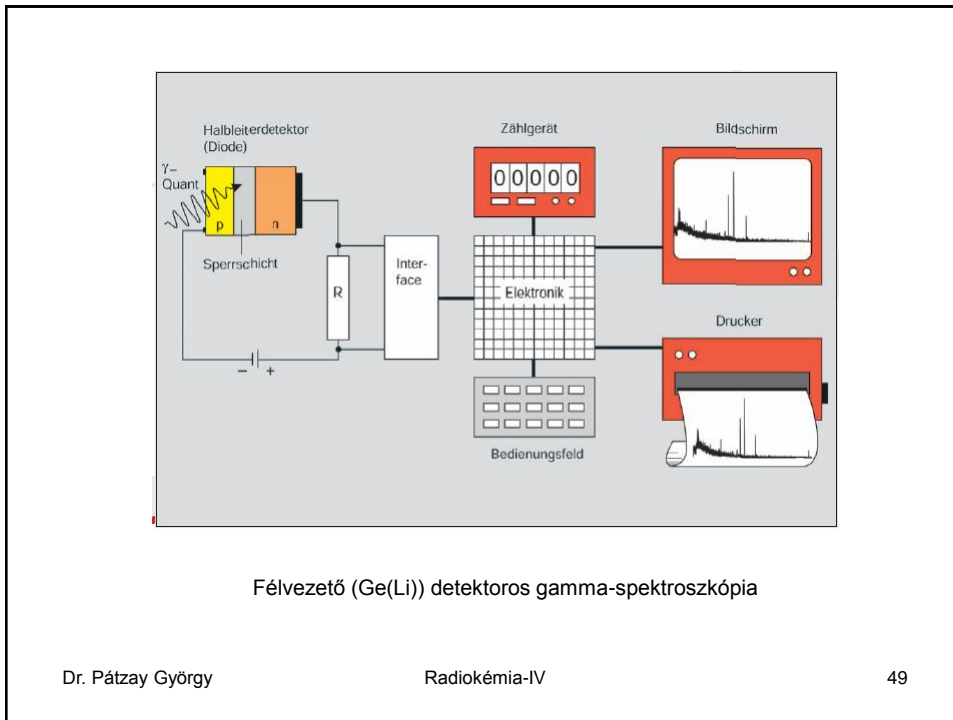
47



Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

48



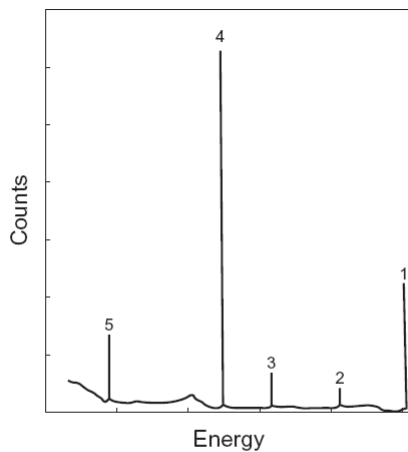


Figure 1 γ -Ray spectrum of ^{24}Na radioisotope taken with an HPGe detector. (1) Photopeak of 2754 keV; (2) SE peak of 2243 keV (2754–511 keV); (3) DE peak at 1732 keV (2754–1022 keV); (4) photopeak at 1369 keV; (5) 511-keV positron annihilation.

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

51

Egyéb detektorok

- Filmdetektorok:** dozimetriai méréseknél és autoradiográfiás méréseknél alkalmazzák.
- Buborékkamra detektor:** hasonló a ködkamrához csak folyadékkal töltik, a sugárzás buborék nyomvonalakhoz létre.
- Szikkamra:** gáztöltésű detektor töltött lemezekkel, ionizáció esetén szikra keletkezik.

Detektorok összehasonlítása

Típus	Detektál	% hatások	Felbontás	Háttér (cpm)	Relatív költség
Ionizációs kamra	α , β	30-100	n/a	Alacsony	-
Proporcionális kamra	α , β	20-50	Kicsi	0-100	-
GM-cső	β γ	<1-30 <1	n/a n/a	10-100 10-20	- -
Nal(Tl)	γ	10-30	200 eV	100-600	+
Ge(Li)/HPGE	γ	Max.10	2 eV	10-100	++
Folyadék szcintilláció	β	50-100	Változó	10-30	+/-

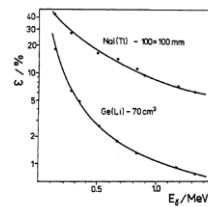
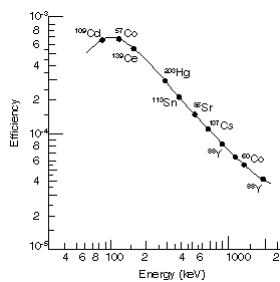
Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

52

Energia (keV)	5.9	1.22	1.332
Proporcionális számláló	1.2	----	----
X-ray NaI(Tl)	3.0	12.0	----
3 x 3 NaI(Tl)	----	12.0	60
Si(Li)	0.16	----	----
Planáris Ge	0.18	0.5	----
Coaxiális Ge	----	0.8	1.8

Energia felbontás (keV FWHM) vs. detektor típus



Hatásfok kalibráció

$n + {}^3\text{He} \rightarrow p + {}^3\text{H} + 765 \text{ keV}$
 where older style BF_3 filled detectors use the equation

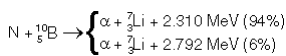
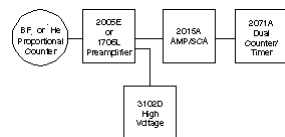
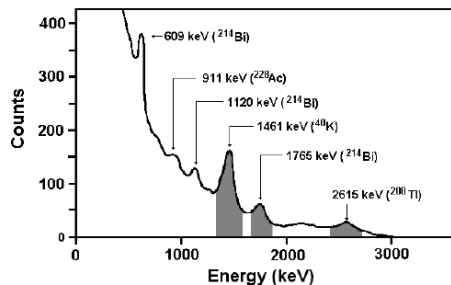
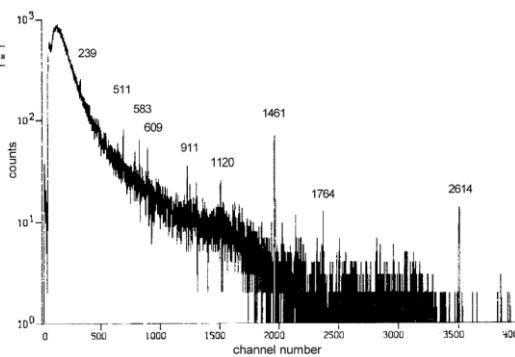
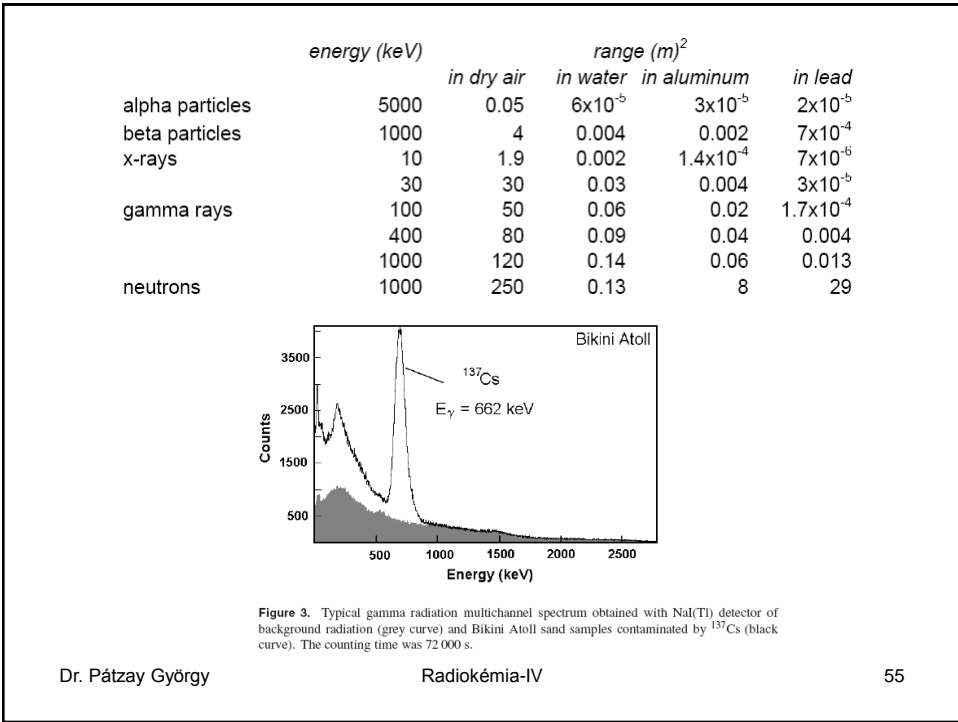


Figure 1.54
Neutron Counter Electro

Energy/keV	Nuclide	Decay series
185.7	${}^{235}\text{U}$	${}^{235}\text{U}$
186.2	${}^{226}\text{Ra}$	${}^{238}\text{U}$
209.4	${}^{232}\text{Ac}$	${}^{232}\text{Th}$
238.04	${}^{232}\text{Ac}$	${}^{232}\text{Th}$
241.9	${}^{214}\text{Pb}$	${}^{238}\text{U}$
270.3	${}^{228}\text{Ac}$	${}^{232}\text{Th}$
295.2*	${}^{214}\text{Pb}$	${}^{238}\text{U}$
328.3	${}^{228}\text{Ac}$	${}^{232}\text{Th}$
338.7	${}^{228}\text{Ac}$	${}^{232}\text{Th}$
352.0*	${}^{214}\text{Pb}$	${}^{238}\text{U}$
463.0	${}^{228}\text{Ac}$	${}^{232}\text{Th}$
511.0*	annihilation peak	
583.1*	${}^{208}\text{Tl}$	${}^{232}\text{Th}$
609.3*	${}^{214}\text{Bi}$	${}^{238}\text{U}$
661.6	${}^{137}\text{Cs}$	
727.2	${}^{232}\text{Bi}$	${}^{232}\text{Th}$
768.4	${}^{234}\text{Bi}$	${}^{238}\text{U}$
794.8	${}^{232}\text{Bi}$	${}^{232}\text{Th}$
860.4	${}^{208}\text{Tl}$	${}^{232}\text{Th}$
911.2*	${}^{228}\text{Ac}$	${}^{232}\text{Th}$
934.1	${}^{214}\text{Bi}$	${}^{238}\text{U}$
964.4	${}^{228}\text{Ac}$	${}^{232}\text{Th}$
968.8	${}^{228}\text{Ac}$	${}^{232}\text{Th}$
1001.2	${}^{234}\text{Pb}$	${}^{238}\text{U}$
1120.3	${}^{214}\text{Bi}$	${}^{238}\text{U}$
1238.1	${}^{214}\text{Bi}$	${}^{238}\text{U}$
1371.7	${}^{214}\text{Bi}$	${}^{238}\text{U}$
1408.0	${}^{214}\text{Bi}$	${}^{238}\text{U}$
1460.8*	${}^{40}\text{K}$	
1509.2	${}^{214}\text{Bi}$	${}^{238}\text{U}$
1587.9	${}^{228}\text{Ac}$	${}^{232}\text{Th}$
1729.6	${}^{214}\text{Bi}$	${}^{238}\text{U}$
1764.6*	${}^{214}\text{Bi}$	${}^{238}\text{U}$
1847.4	${}^{214}\text{Bi}$	${}^{238}\text{U}$
2204.1	${}^{214}\text{Bi}$	${}^{238}\text{U}$
2614.6*	${}^{208}\text{Tl}$	${}^{232}\text{Th}$

* most intense peaks.

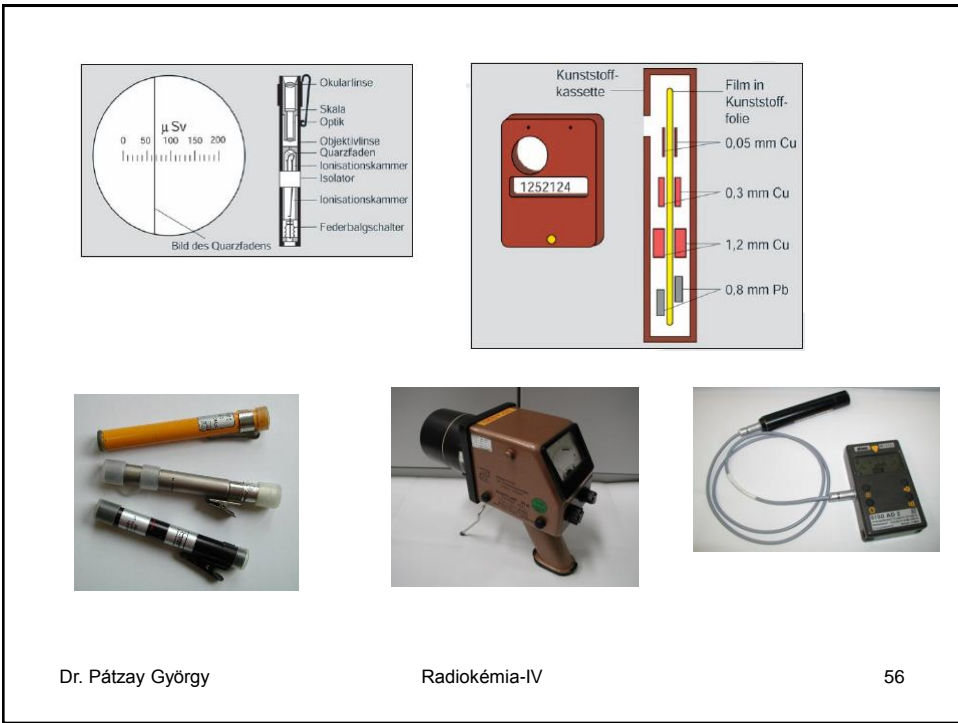




Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

55



Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

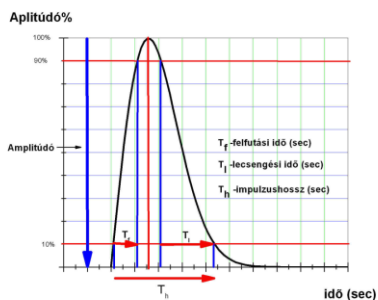
56

Nukleáris elektronika

- Tápfeszültség biztosítása
- Jelfeldolgozás
- Számlálás
- Kiértékelés
- Kijelzés

Gyakran a kialakult töltésimpulzust feszültségimpulzussá alakítják át.

A amplitúdó (V)
 T_f felfutási idő (sec)
 T_l lecsengési idő (sec)
 T_h impulzus hossz (sec)



A feszültségimpulzus polaritása legtöbbször negatív.

Detektorok jellemzői

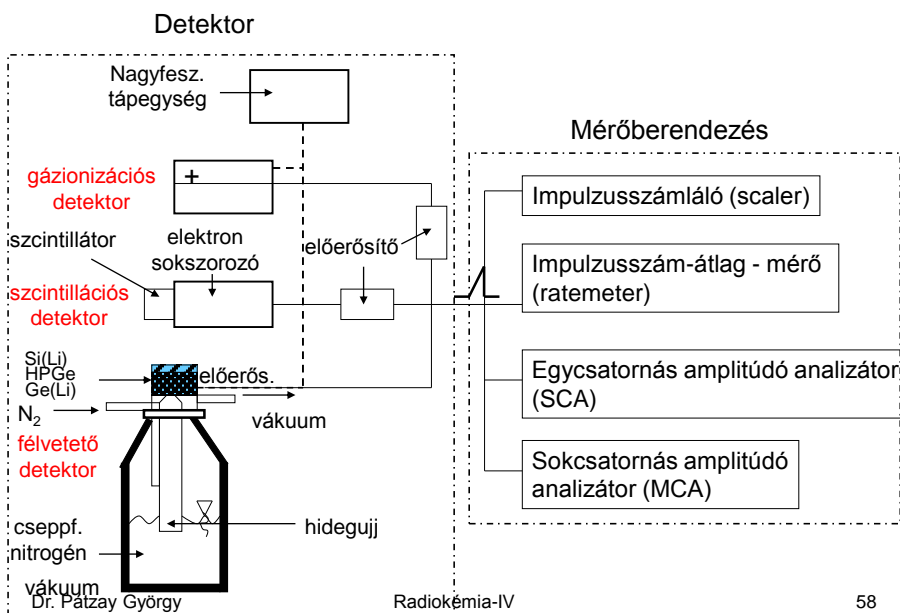
Detektor	Amplitúdó	T_f	T_l
GM-cső	0,1-5 V	μ s	50-300 μ s
Nal(Tl)	1 mV-10 V	10^{-3} -1 μ s	10
Ge(Li)	0,1-2 mV	0,1 μ s	1-2 μ s

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

57

Nukleáris mérőberendezések kialakítása és tervezése



Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

58

Erősítők

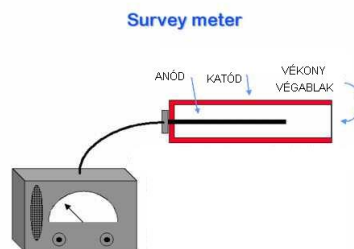
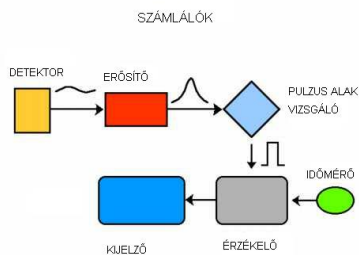
Lineáris erősítés szükséges, a torzítás < 1% kell hogy legyen. A szükséges jel/zaj viszony 2-20 között kell hogy legyen.

Tápegységek

100-5000 V egyenfeszültség.

Mérőberendezések

- Impulzus számlálók
számok tárolása kettes számrendszerben. Egy 8-dekádós számláló 10^8-1 impulzus számlálására alkalmas. BCD-kódolás (1001 0100 1000 = 948).
- Rataméterek (szintmérők)
Az időegység alatt átlagosan kapott jelek számát folyamatosan detektálják és kijelzik. Minden impulzus Q töltést visz egy kondenzátorra és egyensúly áll be, ha R ellenálláson ugyanannyi áram folyik el, mint amennyit a bejövő impulzusok szolgáltatnak. Dozimetriában alkalmazzák. GM-cső rataméterrel –survey meter.



Számlálók: 500 cps-ig érzékenyek, az összes detektorhoz alkalmazhatók, mérsékelt az áruk, de nem képesek diszkriminációra, túl magas beütésszámot veszteséggel számolnak.

- Amplitúdó diszkriminátorok
Jelalak diszkrimináció – ha a jel felfutási és lefutási meredeksége eltérő.
Idődiszkrimináció.
Amplitúdó diszkrimináció: integrális - differenciális

INTEGRÁLIS ÉS DIFFERENCIÁLIS AMPLITÚDÓ DISZKRIMINÁLÁS

SCA

•Analizátorok

Egycsatornás (SCA) –sokcsatornás (MCA). Amplitúdó→ frekvencia átalakítás ADC. Az alapvonal (base line) és a hozzá rögzített felső küszöb együtt egy ablakot képez, melyet a növekvő amplitúdók irányában mozgatunk és minden pozícióban beütésszámot mérünk. Alkalmazható NaI(Tl) detektorral, 200 eV-os felbontás, vagy Ge(Li) detektorral, 2 eV-os felbontás.

MCA→ 1024-8192 csatorna, egyidejű mérés, egy méréssel a teljes γ -spektrum felvehető. Rögzítés mágneses memóriában, kijelzés képernyőn, kiértékelés számítógépes programokkal. Alkalmas radionuklidok mennyiségi és minőségi mérésére (környezeti minták, aktivációs analízis).

Dr. Pátzay György Radiokémia-IV 61

Adatok analóg-digitális kezelése

- Analóg: folytonos hullámalak az amplitúdóképviseli a jel numerikus nagyságát
- Digitális előnyei:
 - Hibahalmazódásnak ellenáll
 - Hiba javítása lehetséges a redundáns információ megőrzése mellett
 - A digitális áramkör gyakran olcsóbb mint az analóg
- Az analóg előnyei:
 - Gyakran gyorsabb

A

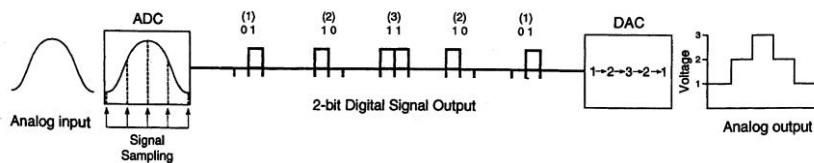
B

C

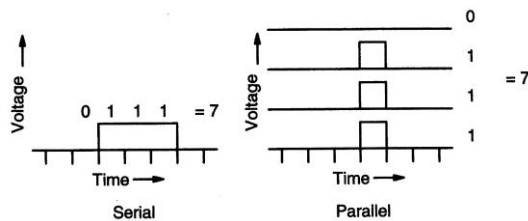
D

Dr. Pátzay György Radiokémia-IV 62

Analog-digitális konverzió (ADC)



Soros-párhuzamos adatátvitel



Dr. Páztay György

Radiokémia-IV

63

Matematikai műveletek

Összeadás

$$\sum_{i=1}^N x_i = x_1 + x_2 + x_3 \cdots x_N$$

Szorzat (produkt)

$$\prod_{i=1}^N x_i = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdots x_N$$

Számítási (aritmetikai) átlag

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Mértani (geometriai) átlag

$$\bar{x}_g = \sqrt[N]{x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdots x_N} = \sqrt[N]{\prod_{i=1}^N x_i}$$

A mértani átlagot általában arányok, vagy változási sebességek átlagolásában alkalmazzák.

Harmonikus átlag

$$x_h = \frac{N}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \frac{1}{x_3} + \cdots + \frac{1}{x_N}} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{x_i}}$$

Dr. Páztay György

64

Négyzetes átlag

$$\bar{x}_{rms} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + \dots + x_N^2}{N}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

Elsősorban az elektronikában alkalmazzák.

A következő adatsorra:

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10:

Számtani átlag	5,50
Mértani átlag	4,53
Harmonkus átlag	3,41
Négyzetes átlag	6,20

Súlyozott számtani átlag

$$x_w = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \cdot w_i}{\sum_{i=1}^N w_i}$$

$$w_i = \frac{1}{s_i^2}$$

A radioaktív beütésszámok hibái a mért érték négyzetgyökével arányosak, ezért változnak és az átlagban súlyozni kell. A súly leggyakrabban a mért érték szórásnégyzetének reciproka.

A gyakorlatban legtöbbször az ismételt mérések egyszerű, súlyozatlan számtani átlagát alkalmazzák, mert ez általában csak kismértékben tér el a súlyozott számtani átlag értékétől.

Példa: ^{204}Tl béta-sugárzó sugárforrás beütésszámaikat határoztuk meg GM-detektorral 20 párhuzamos méréssel. Mekkora a súlyozatlan és súlyozott számtani átlaguk és szórásuk?

sorszám	beütésszám, N(i)	szórás, s(i)	$w(i)=1/(s(i)^2)$	$w(i)N(i)$
1	107	10.34	0.009345794	1.00
2	109	10.44	0.009174312	1.00
3	94	9.70	0.010638298	1.00
4	117	10.82	0.008547009	1.00
5	117	10.82	0.008547009	1.00
6	112	10.58	0.008928571	1.00
7	111	10.54	0.009009009	1.00
8	126	11.22	0.007936508	1.00
9	117	10.82	0.008547009	1.00
10	93	9.64	0.010752688	1.00
11	82	9.06	0.012195122	1.00
12	115	10.72	0.008695652	1.00
13	110	10.49	0.009090909	1.00
14	99	9.95	0.01010101	1.00
15	98	9.90	0.010204082	1.00
16	113	10.63	0.008849558	1.00
17	95	9.75	0.010526316	1.00
18	107	10.34	0.009345794	1.00
19	98	9.90	0.010204082	1.00
20	92	9.59	0.010869565	1.00
Összegek				
20	2112	205.245817	0.191508296	20
Dr. Pátzay György				
szórás= 11.15			súlyozott szórás=	5.221706

Az eredményekből jól látható, hogy az egyes beütésszám mérések szórása (hibája) ingadozik, a súlyozatlan és súlyozott számtani átlagok értéke közeli érték.

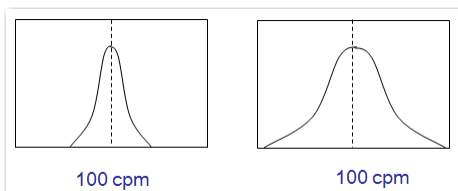
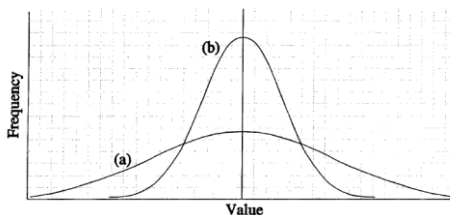
Ugyanakkor az egyes mérések szórása az átlaghoz képest a súlyozott esetben a súlyozatlan eset szórásának mintegy 50%-a!

Radiokémia-IV

67

Szórások meghatározása

Két adathalmaz hasonló átlagértékkel rendelkezik, de más jellemzőben különbözhet. Például az egyik adathalmaznak sokkal nagyobb a szórása



Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

68

A variancia

$$V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$$

Az egyes mérési eredmények és a számított átlagérték különbségei négyzeteinek összege. Egyszerűsítés után a mért értékek négyzeteinek átlag mínusz a számított átlag négyzete. Mértékegysége a mért érték mértékegységének négyzete. Ez probléma.

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \\ &= \frac{1}{N} \sum x_i^2 - \frac{1}{N} \sum 2x_i \bar{x} + \frac{1}{N} \sum \bar{x}^2 \\ &= \frac{1}{N} \sum x_i^2 - \frac{1}{N} 2\bar{x} \sum x_i + \frac{1}{N} \bar{x}^2 \sum (1) \\ &= \overline{x^2} - 2\bar{x}^2 + \bar{x}^2 \\ &= \overline{x^2} - \bar{x}^2 \end{aligned}$$

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

69

A standard deviáció (eltérés)

$$\sigma = \sqrt{V} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

A variancia négyzetgyöke. A mértékegysége egyezik a mért érték mértékegységével. Értéke nem egyezik az egyes mérési pontok és az átlagérték átlagos különbségével.

$$\frac{1}{N} \sum |x - \bar{x}| \neq \sqrt{\frac{1}{N} \sum (x - \bar{x})^2}$$

A sokaság és a minta standard deviációja

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (x_i - \mu)^2}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_i (x_i - \bar{x})^2}$$

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

70

Statisztikai (valószínűségi eloszlások)

- A sokaság (populáció) valószínűségi eloszlását különböző matematikai függvényekkel írhatjuk le.
- A valószínűségi eloszlásokat alkalmazó statisztikai módszereket paraméteres módszereknek nevezik.

Binomiális eloszlás

Azokra az eseményekre vonatkoztatható, ahol két valószínű esemény következhet be (igen-nem, van jel-nincs jel stb.) Az egyik esemény bekövetkezésének r száma n eseményből p , az ellenkezője $1-p$ valószínűséggel következik be. :

$$P(r; p, n) = p^r \cdot (1-p)^{n-r} \cdot \frac{n!}{r!(n-r)!}$$

Annak a valószínűsége, hogy N radioaktív atomból n db elbomlik T idő alatt ($q=1-p$):

$$P_n = \frac{N!}{n!(N-n)!} p^n q^{N-n}$$

Dr. Páztay György

Radiokémia-IV

71

Példa: Mi a valószínűsége annak, hogy egy napon a kórházban naponta születő 12 gyermekből 10 leány lesz?

$$\begin{aligned} P(10; 0.5, 12) &= 0.5^{10} \cdot (1-0.5)^{12-10} \cdot \frac{12!}{10!(12-10)!} \\ &= 0.016 \text{ vagy } 1.6\% \end{aligned}$$

Normális (Gauss) eloszlás

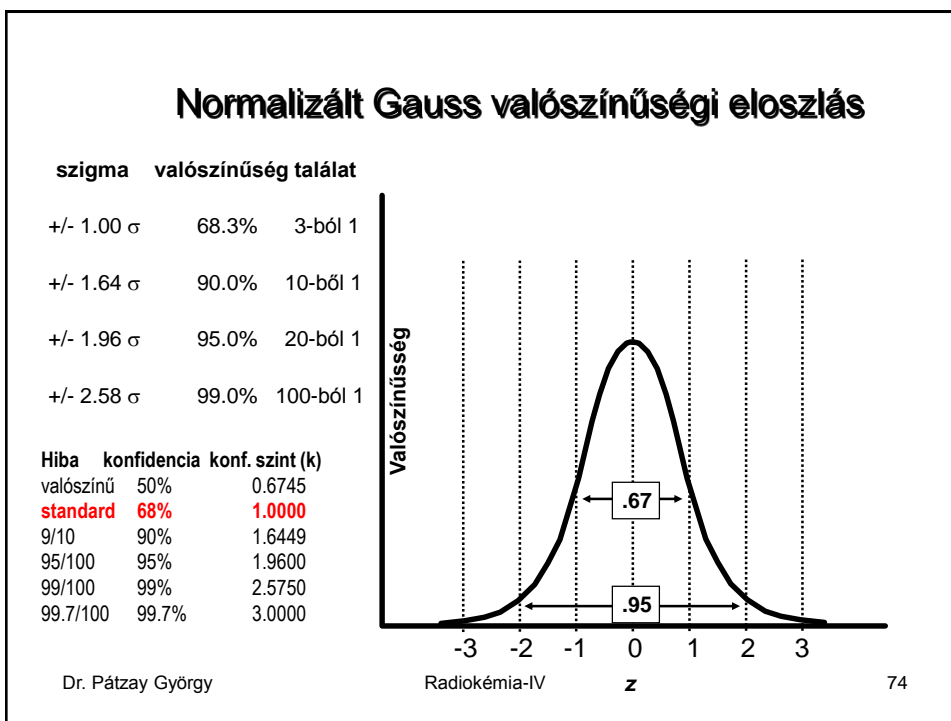
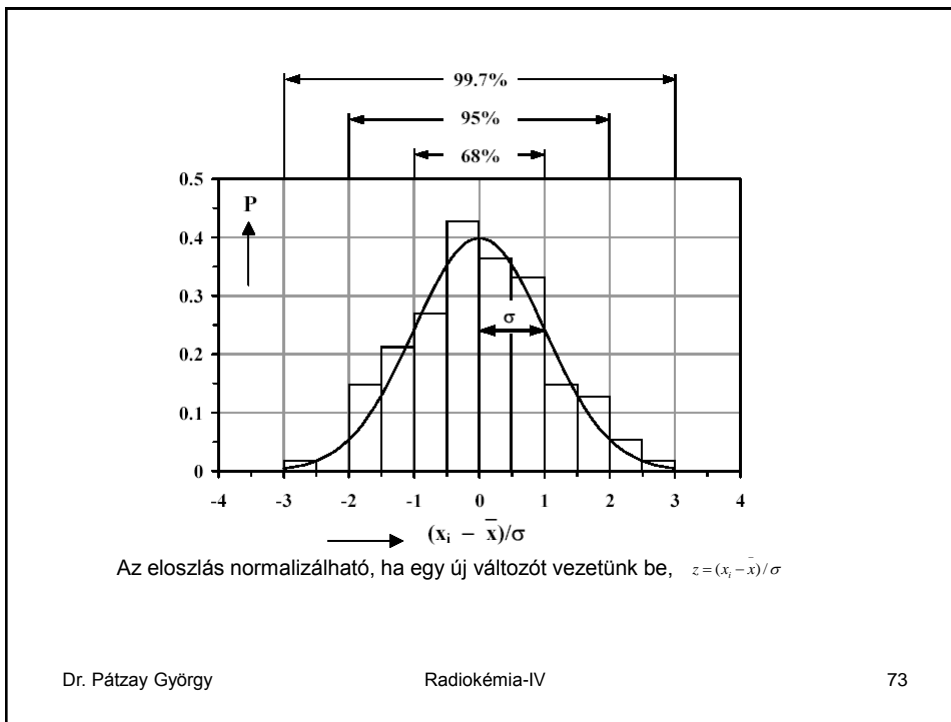
X esemény bekövetkezésének valószínűsége egy μ átlaggal és σ standard deviációval jellemezhető normális eloszlásban::

$$P(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Dr. Páztay György

Radiokémia-IV

72



Poisson eloszlás

A Poisson eloszlásban egy véletlenszerűen bekövetkező r esemény időbeli gyakoriságát határozzuk meg, akkor ha a bekövetkezés várható gyakorisága λ

$$P(r; \lambda) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^r}{r!}$$

Villámlás gyakorisága
Balesetek bekövetkezése
Telefonhívás gyakorisága

Az eloszlás varianciája és szórása

$$V_{(r)} = \lambda$$

$$\sigma = \sqrt{\lambda}$$

Nagyon hasznos eloszlás típus, mert varianciája a várható értékkel, standard deviációja a várható érték négyzetgyökével arányos. A radioaktív beütésszámok eloszlását Poisson eloszlással jellemezhetjük, ahol az átlagérték szórása, az átlagérték négyzetgyöke!

Dr. Pálzay György

Radiokémia-IV

75

A variációs együttható vagy más néven relatív szórás

A szórásnak az átlaghoz viszonyított százalékos értékében mutatja az adatok változékonyságát. Értékét a szórás és az átlag hányadosa adja (s / \bar{x}). Jelölése: v , s%, CV.

$$V(\%) = CV(\%) = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100$$

Példa: Hány beütésszámot kell gyűjtenünk ahhoz, hogy a relatív szórás maximum 1% legyen?

$$\text{Mivel } CV = \frac{s}{\bar{x}} (100) = \frac{s}{\lambda} (100)$$

$$\text{és } s = \sqrt{\lambda}$$

$$0.01 = \frac{s}{\lambda} = \frac{\sqrt{\lambda}}{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}$$

$$\lambda = \frac{1}{(0.01)^2} = 10000 \text{ beütés}$$

A Student-eloszlás

Ha egy nagy sokaságból kisszámú mintát veszünk, bizonyos egyszerűsítések végezhetőek. Főlmerül a kérdés, hogy a minta átlaga jól közelíti-e a sokaság várható értékét ($\bar{x} \sim \mu$), illetve a mintából származó standard deviáció jól közelíti-e a sokaság standard deviációját ($s \sim \sigma$)? Ha nem tudjuk a válaszokat, nem biztos, hogy a minta eloszlása egyezik a sokaság eloszlásával!

Dr. Pálzay György

Radiokémia-IV

76

Az egyszerűsítés lényege, hogy a két változót, a mintaátlagot és a mintaszórást

egy új t változóban egyesítjük:
$$\frac{(x - \bar{x})}{s} = t$$

Az új t változó eloszlása nem a normális eloszlást, hanem az ún. Student, vagy t -eloszlást követi. A Student eloszlás alkalmazása feltételezi, hogy:

- az átalakítás előtti, kiindulási eloszlás normális eloszlás volt,
- azt, hogy a t -eloszlás mennyire közelíti a normális eloszlást az N szabadsági fok határozza meg,
- $N > 30$ esetén a két eloszlás közötti különbség elhanyagolható.

A Student-féle t -eloszlás alkalmazható arra is, hogy vizsgáljuk a mintaátlag és a sokaság várható értéke közötti eltérés nagyságát:

$$t = \frac{(\bar{x} - \mu)}{\left(\frac{s}{\sqrt{N}} \right)}$$

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

77

A radioaktív mérések jellemzői

• Radioaktív sugárzás mérése során az ismételt mérés nem szolgáltat ugyanolyan eredményt. Ennek oka, hogy a radioaktív sugárzás mérése, detektálása is statisztikus ingadozással terhelt. A radioaktív bomlás maga és a detektálás is statisztikus jellegű, ezért **sohasem egy mérést** végzünk, **hanem páratlan számú mérési sorozatot**, melyből valamilyen **átlagot** (súlyozatlan, vagy súlyozott számtani átlag) és az egyes mérések átlag körüli ingadozásának, szórásának jellemzésére valamilyen **szórási jellemzőt** (korrigált empirikus szórás) számítunk.

• Nem alkalmazható ez a módszer, ha: a radionuklid rövid felezési idejű, vagy ha kis aktivitások mérésénél hosszú mérési időt alkalmazunk.

• A radioaktív sugárzások detektálása során három fontos hibatípus jelentkezésével kell számolnunk: a **durva hibákkal**, a **szisztematikus hibákkal** és a **véletlenszerű, vagy statisztikus hibákkal**.

➤ A **durva hiba** akkor lép fel, ha valamilyen alapvető hiányosság, meghibásodás, félreértés lép fel a mérés során. Ilyen hiba lehet például, ha gamma spektroszkópiás mérésnél a nagyfeszültségű tápegységet elfelejtjük bekapcsolni és úgy indítjuk el a mérést. Általában a durva hiba jelenléte könnyen felismerhető.

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

78

➤ Sokkal alattomosabbak a *szisztematikus hibák*, melyek általában egy irányban tolják el mérés eredményét. Például az energia, vagy határfok szerint rosszul kalibrált sokcsatornás analizátorral végzett mérés hibás, eltolt eredményt ad a minőségi elemzésre és a mennyiségi elemzésre is. A szisztematikus hibák kimutatása és kiküszöbölése kalibrálással végezhető el.

➤ A jól beállított mérőkészülékeknel *véletlenszerű, statisztikus hibák* léphetnek fel. Ezek **számos egymástól független folyamatok kismértékű ingadozásából** származnak és az eredő hatásuk jelentkezik. Például az elektronikai egységek (tápfeszültség, erősítő, diszkriminátor, számláló stb.) tulajdonságainak ingadozása statisztikus ingadozást okoz. A radioaktív bomlás időbeni ingadozása a binomiális eloszlással, közelítőleg az ún. Poisson eloszlással, illetve nagyobb számú jel (>25) esetén normális, vagy Gauss-féle eloszlással írható le. Ehhez az ingadozáshoz adódnak hozzá a mérő berendezés elektronikájának ingadozásai

A radioaktív bomlás ingadozása az ún. binomiális eloszlással írható le. Ha az események (bomlások) valószínűsége kicsi ($p \ll 1$) akkor a Poisson eloszlással jól le lehet írni. Ha az események (bomlások) száma nagy (>20), akkor a Poisson eloszlás a normális Gauss féle eloszlással közelíthető

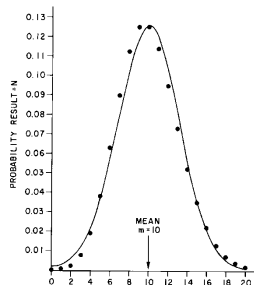
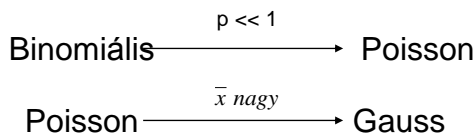


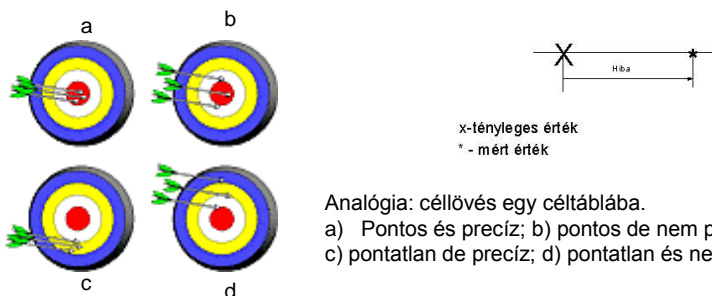
Fig. 6-1. Poisson distribution, m , and variance, σ^2 , $n = 30$.

Nukleáris mérések hibái

A radioaktív bomlás statisztikus jellegű. Az $N_t = N_{t0} e^{-\lambda t}$ összefüggés csak egy valószínűséget ad meg.

Mérési hiba: a mért és a tényleges (leggyakrabban nem ismert) érték közötti eltérés.

A mérés **reprodukálhatósága (precizitás)** jellemzésére az egyes mérések közötti átlagos eltérést a szórást alkalmazzuk.



Analogia: céllövés egy céltáblába.

- a) Pontos és precíz; b) pontos de nem precíz;
c) pontatlan de precíz; d) pontatlan és nem precíz

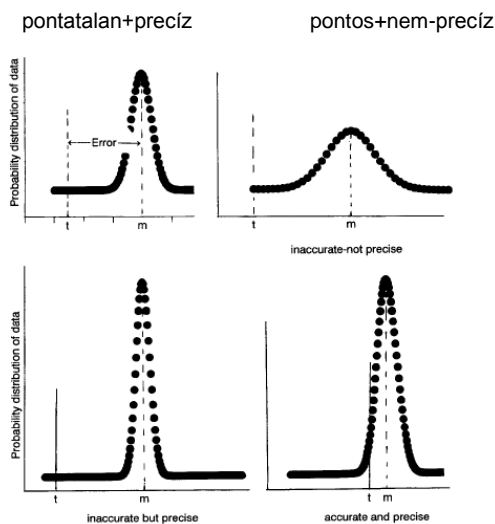
Hibák: durva hibák, szisztematikus hibák, véletlenszerű (statisztikus) hibák

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

81

Pontosság, precizitás, realitás



Dr. Pátzay György

Pontatlan+precíz Radiokémia-IV pontos+precíz

82

A nukleáris mérés technikában figyelembe kell venni a vizsgált jelenség (bomlás) statisztikus jellegét, mely Poisson eloszlással jellemezhető. A számlálási hibák számos forrásból származnak:

Bomlási statisztikai	Háttér ingadozás	Detektor felbontás
Számláló felbontás	Számlálási hatások	Abszorpció/Önabszorpció
Geometria	Feloldási idő	Visszaszórás

Háttér

Ugyancsak ingadozik az időben, ezért külön célszerű mérni és az átlagértékét levonni a mért (bruttó) beütésszámból.

$$N_{\text{netó}} = N_{\text{bruttó}} - N_{\text{háttér}}$$

$$\sigma_{\text{mért}} = \pm \sqrt{(\sigma_{\text{bruttó}}^2 + \sigma_{\text{háttér}}^2)}$$

Ha a háttér átlaga kisebb mint a mért bruttó beütésszám átlagának 1%-a, a háttér levonása elhanyagolható! A háttér beütésszám mérés hibája csökkenthető: hosszabb háttérmérési idő választásával, nagyobb aktivitású minta mérésével, diszkriminátor alkalmazásával.

Felbontási hibák:

Az erősen radioaktív mintákból kilépő nagyszámú részecskét a berendezés nem képes mind megszámolni. A GM-cső feloldási ideje ~ 200 μ s, a NaI(Tl) detektoré ~ 2 μ s beütésenként. Az egyszerű számlálók maximum 10^6 cpm számlálási sebességet bírnak el, az analizátorok lassabbak.

Detektor felbontási hibák:

A legtöbb mérésnél elégséges, ha relatív aktivitásokat határozunk meg, így a hatások nem probléma. Hatások meghatározás szükséges az abszolút aktivitás meghatározásához. A detektor hatások időben és az energia függvényében változhat, ezért rendszeresen ellenőrizni kell. Ezt legegyszerűbben lehetőleg a mért radionukliddal és a mérési geometriával megegyező, kalibrált, ismert aktivitású standarddal végezhetjük el.

DETEKTOR HATÁSFOKOK

DETEKTOR	SUGÁRZÁS	% HATÁSFOK
2PI-PRORCIONÁLIS D.	α, β	10-50
GM	β	<1-30
	γ	<1
NaI(Tl)	γ	10-30
FOLYADÉK SZCINTIL.	β	50-100
Ge(Li)	γ	≤ 10

$$\% \text{ hatások} = \frac{\text{mért} - \text{beütésszám}}{\text{várt} - \text{bomlások} - \text{száma}}$$

Detektor hatásfok

A detektor hatásfoka a megszámlált impulzusok száma a minta aktivitás százalékában.

$$\text{detektorhatásfok} = \varepsilon = \frac{\text{cpm}}{\text{dpm}} = \frac{\text{cps}}{\text{dps}}$$

A detektor hatásfokot befolyásolja:

•A bomlás során emittált sugárzás detektorba jutó hányada (térzőg, abszorpció. Szórás stb.)

A detektorba bejutó sugárzás jelet generáló hányada

Példa: Egy 12500 dpm aktivitású sugárforrás a detektorban 2840 cpm beütésszámot generált. Mekkora a detektor hatásfoka:

$$\varepsilon = 2840/12500 = 0,2272 \text{ azaz } 22,72\%$$

Feloldási idő (holtidő) τ

A detektor számlálási sebessége a detektor holtidejétől és a mérőberendezés holtidejéből származik. A holtidő alatt beérkező újabb részecskét a detektor és/vagy számláló nem képes érzékelni. A GM csövek holtideje 100-300 μ s, a szcintillációs detektoroké 10-20 μ s, a standard számlálók 100000-300000cps beütésszámot mérnek elfogadható veszteséggel. Nagyobb aktivitás, belépő részecske fluxus esetén a holtidő az intenzitás négyzetével arányosan nő. A holtidők összege a feloldási idő. Ha jelentős a számlálási veszteség korigálni szükséges a mért intenzitást a holtidős veszteséggel.

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

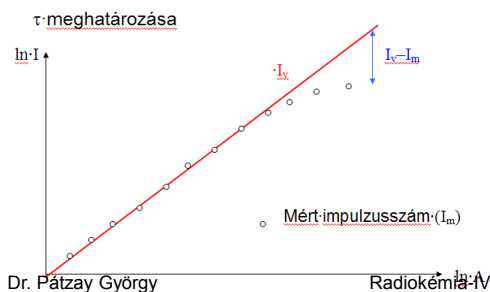
85

A valódi, holtidő hatás nélkül mért intenzitás ($I_{\text{valódi}}$) számítható a mért intenzitás ($I_{\text{mért}}$) és a feloldási idő (holtidő) ismeretében:

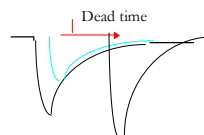
$$I_{\text{valódi}} = \frac{I_{\text{mért}}}{1 - \tau \cdot I_{\text{mért}}} \quad \tau = (I_{\text{valódi}} - I_{\text{mért}}) / (I_{\text{valódi}} \cdot I_{\text{mért}})$$

Példa: Egy GM-csöves mérési sorozatban a mért intenzitás értékek átlaga 120000cpm volt, mekkora a holtidővel korigált valódi mért intenzitás, ha a feloldási idő 200 μ s, azaz 0,0002sec?

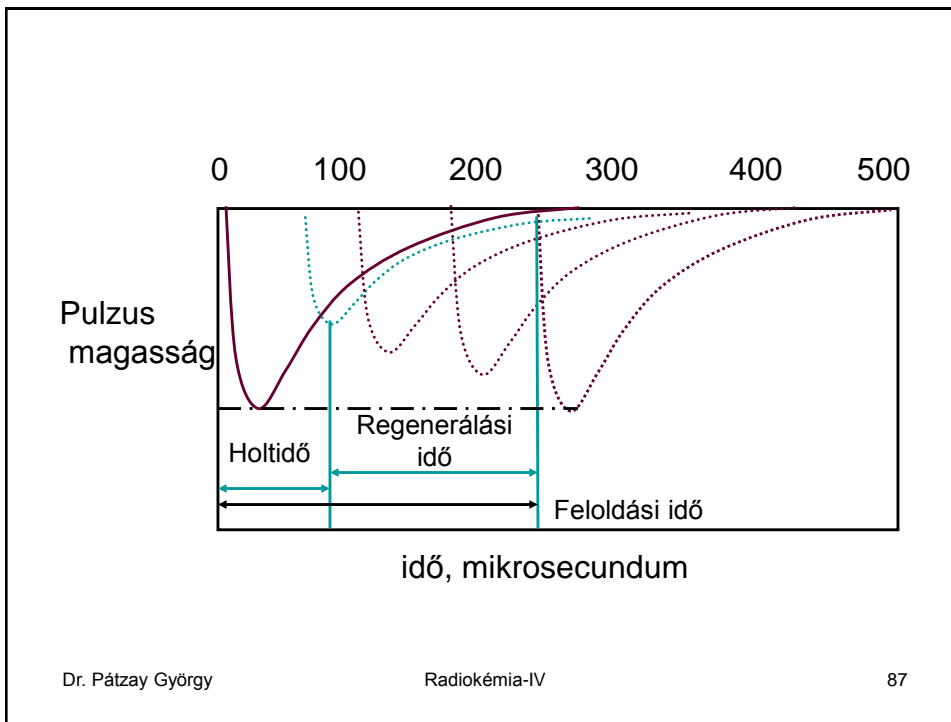
$$I_{\text{mért}} = 120000/60 = 2000 \text{ cps}, \quad \tau = 0,0002 \text{ sec}, \quad I_{\text{valódi}} = 2000 / (1 - 0,0002 \cdot 2000) = 3333,3 \text{ cps}$$



Dead Time in Pulse Counting



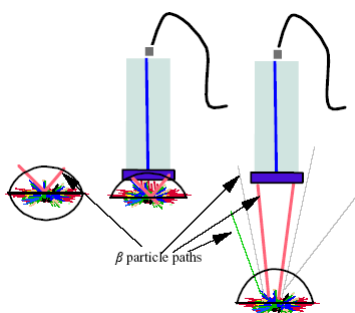
86



Statisztikus hibák

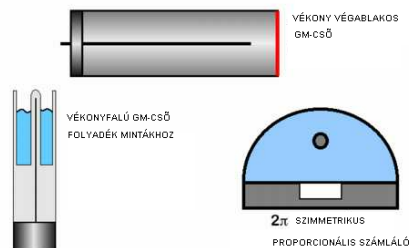
A radioaktív bomlás statisztikus hibával terhelt véletlen jellegű jelenség. Nem lehet pontosan megmondani, adott nuklid mikor fog elbomolni. Ezért: nagyszámú bomlást kell mérni és a valószínűség törvényeit kell alkalmazni.

Sugárzás abszorpciója: α abszorpció $>$ β abszorpció $>$ γ abszorpció. Az α és β sugárzás már a mintában is elnyelődhet és abszorbálódik a levegőben, a detektor ablakában, falában stb. Ez csökkenthető vékony végablakos detektor alkalmazásával, vagy a mintának a detektor belsejében (gázterében) való elhelyezésével, vékony rétegű minta készítésével..



Térszög hatása

Dr. Pátzay György



Sugárabszorpciót csökkentő detektorok

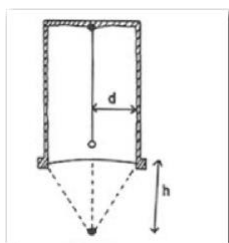
Radiokémia-IV

88

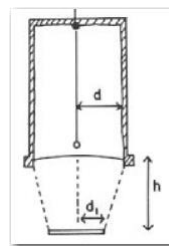
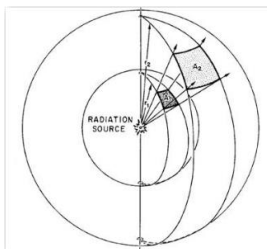
A geometriai (térszög faktor)

$$A = f_g \cdot \dots \cdot I$$

$$f_g = \frac{\Omega}{4\pi}$$



pontforrás



lemez (diszk) forrás

$$f_g = 0,5 \left(1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 + d^2}} \right)$$

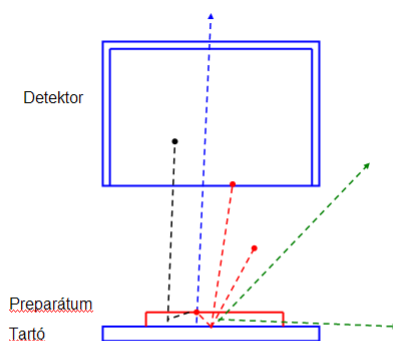
$$f_g = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 + d^2}} \right) - \frac{3}{16} \cdot \left(\frac{d \cdot d_1}{h^2} \right)^2 \cdot \left(\frac{h}{\sqrt{h^2 + d^2}} \right)$$

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

89

Aktivitás és Beütésszám



→ Geometriai faktor (térszög $< 4\pi$)

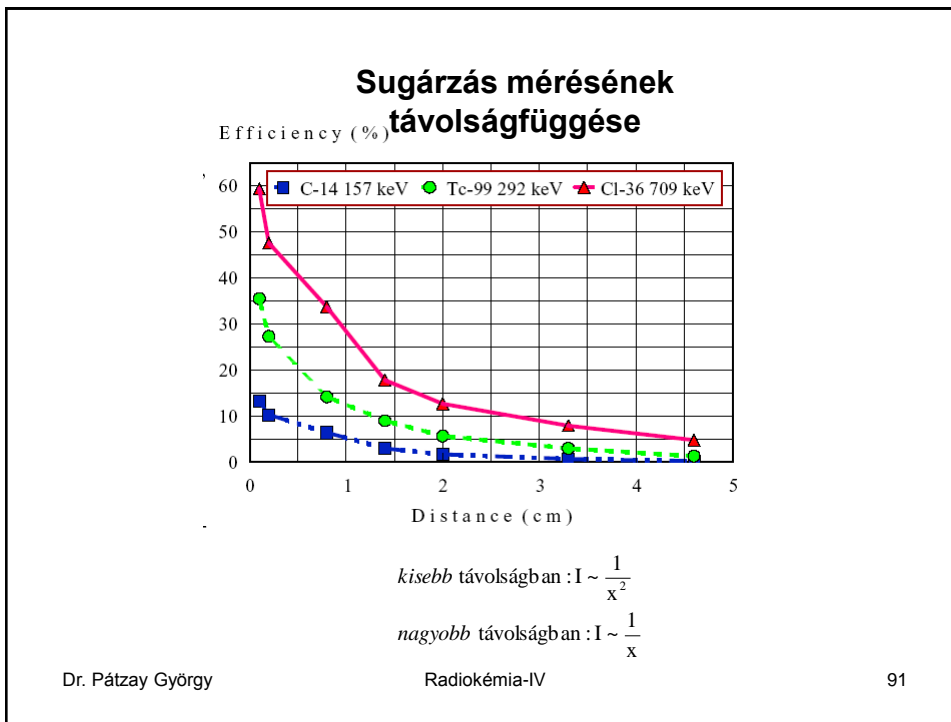
→ Abszorpció a preparátumban, levegő, detektor ablak (α - és β - részecskék)

→ Áthaladás a detektoron kölcsönhatás nélkül (γ - kvantumok)

+ viisszaszórás a preparátumban és a tartóban

Dr. Pátzay György

90



Geometriából adódó hibák:

A mérések során a mintát mindig a detektor közepére kell elhelyezni és mérés közben a minta nem mozdulhat el. Folyadékba merített detektornál ez nem probléma. Célyszerű mintatartót alkalmazni.

A statisztikus hibák figyelembe vétele

Mindig több (páratlan számú) mérést végzünk és az eredményt az ismételt mérések átlagértékeként adjuk meg.

Nem alkalmazható, ha: a nuklid rövid felezési idejű, vagy ha kis aktivitások mérésénél hosszú mérési időt alkalmazunk.

$$\bar{X} = \frac{\sum_i X_i}{n}$$

Az átlagérték mellett meg kell adnunk egy az egyes mérések szórására jellemző értéket. Ezt kétféleképpen számíthatjuk:

Dr. Pátzay György Radiokémia-IV 92

$$s = \pm \sqrt{\bar{N}} \approx \sqrt{N}$$

$$s = \pm \sqrt{\frac{\sum_i (N_i - \bar{N})^2}{n-1}}$$

Az első szórás érték csak a radioaktív bomlás statisztikus hibáját (Poisson eloszlás) veszi figyelembe, míg a második eloszlástól független, és tartalmazza a bomlás statisztikus hibáját+a mérő berendezés hibáit is. Ha a kétféle módon számított szórás egyezik, ez azt jelenti, hogy a mérőkészülékünk hibája elhanyagolható, azaz jó a berendezésünk.

Relatív hiba: ha csak a bomlási ingadozással számolunk

$$V(\%) = \pm \frac{\sqrt{\bar{N}}}{\bar{N}} \cdot 100 = \pm \frac{1}{\sqrt{\bar{N}}} \cdot 100$$

Így 10000 cpm esetén $V(\%) = 1\%$

Ha m db n mérésből álló mérést végzünk a mérésátlagok is szórnak. Ekkor az átlagok szórása:

$$s_x = \pm \frac{\sqrt{\sum_{i=1,n} (N_i - \bar{N})^2}}{m(n-1)}$$

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

93

Ha m db sorozatot mérünk és az n-szer megismételt t mérési idő alatt mért impulzusok (N_i) átlagát kiszámítjuk:

$$\bar{N} = \sum_{i=1,n} N_i \quad \bar{I} = \frac{\bar{N}}{t} \quad s_I = \pm \frac{\sqrt{\bar{N}}}{t} = \pm \sqrt{\frac{\bar{N}}{t^2}} = \pm \sqrt{\frac{\bar{I}}{t}} \quad s_i = \pm \sqrt{\frac{\bar{I}}{t \cdot m}}$$

Ha a háttér t_h ideig mérjük és N_h impulzust, a mintát t ideig mérjük és N impulzust mérünk, akkor a nettó beütésszám hibája:

$$s_I = \pm \sqrt{\frac{N_{bruttó}}{t_{bruttó}^2} + \frac{N_{háttér}}{t_{háttér}^2}} = \pm \sqrt{\frac{I_{bruttó}}{t_{bruttó}} + \frac{I_{háttér}}{t_{háttér}}}$$

A háttértől még eltérő szignifikáns beütésszám:

$$N_{\min} = \bar{N} - N_h \geq 3\sqrt{N_h}$$

Mérési hiba lehetséges csökkentése

1) Ha a minta és a háttér mérésére rendelkezésre álló idő adott, ezt a mérésekre rendelkezésre álló idő a minta és a háttérmérés között az alábbiak szerint kell megosztani:

$$\frac{t_{háttér}}{t_{bruttó}} = \sqrt{\frac{I_{háttér}}{I_{bruttó}}}$$

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

94

2) Ha a háttér értéke körülbelül állandó és a háttérmérés ideje nem korlátozott, akkor megfelelően nagy háttérmérési idő esetén:

$$s_I = \pm \sqrt{\frac{N_{\text{bruttó}}}{t_{\text{bruttó}}^2} + \frac{N_{\text{háttér}}}{t_{\text{háttér}}^2}} \approx \pm \sqrt{\frac{N_{\text{bruttó}}}{t_{\text{bruttó}}^2}}$$

Példa: Állandó háttérintenzitás mellett, $N_{\text{bruttó}} = 400$, $t_{\text{bruttó}} = 5$ min, $N_{\text{háttér}} = 100$, $t_{\text{háttér}} = 2.5$ min. Akkor mennyire csökken a háttérméréssel bevitt hiba értéke, ha a háttér mérési időt 250 min értékre növeljük?

2,5 perces háttér esetén a standard szórás:

$$s = \pm \sqrt{\frac{400}{25} + \frac{100}{6,25}} = \pm 5,657$$

250 perces mérési idővel a szórás:

$$s = \pm \sqrt{\frac{400}{25} + \frac{100}{62500}} = \pm \sqrt{16 + 0,0016} = \pm 4,0002$$

Tehát ebben az esetben célszerű megfelelően hosszú háttérmérést végezni!!

3) A háttérbeütésszám csökkentése árnyékolással, alacsony háttérű mérési helyszín biztosításával. (ólmotorony, régi acél, ólom árnyékolás, plexi, alumínium a béta, réz-kadmium-ólm gamma-sugárzás árnyékolásához, coincidencia kapcsolás stb.)

Adott statisztikai hibához rendelhető mérési idő meghatározása

Tételezzük föl, hogy a radioaktív minta nettó beütésszámát adott k%-os relatív szórással kívánjuk mérni. Ismert háttér mért intenzitás és szórás esetén és elvégeztünk egy próba nettó beütésszám $N_{\text{próba}}$ mérést $t_{\text{próba}}$ ideig. Például a megkívánt relatív szórás 1%, a háttér mért intenzitás 100 2 cpm, valamint a bruttó próbamérésnél 2 perc alatt 800 beütést kaptunk? Így próbaként mért bruttó intenzitás $I_{\text{bruttó}}=400$ cpm.

A felhasználható összefüggés a megkívánt mérési időre:

$$t_{\text{bruttó}}(k\%) = \frac{I_{\text{bruttó}}}{(I_{\text{bruttó}} - I_{\text{háttér}})^2 (k/100)^2 - s_{\text{háttér}}^2} = \frac{400}{(400 - 100)^2 (0,01)^2 - 2^2} = 80 \text{ perc}$$

Így 80 percig mérve a 400cpm mért intenzitású forrást a relatív szórás tényleg 1% lesz:

$$s = \pm \sqrt{\frac{I_{\text{bruttó}}}{t_{\text{bruttó}}} + \frac{I_{\text{háttér}}}{t_{\text{háttér}}}} = \pm \sqrt{\frac{400}{80} + 2^2} = \pm 3$$

$$V(\%) = \frac{s}{I_{\text{netó}}} \cdot 100 = \frac{3}{400 - 100} \cdot 100 = 1\%$$

Hibás mérési adatok kizárása

Chauvenet kritérium

$$CR = \frac{(x_{\text{gyanús}} - \bar{x})}{\sqrt{x}} =$$

Lényege, hogy a gyanús kiszórt adat és a mintaátlag különbségét hasonlítjuk az egyes minta szórásához. Ha ez az arány nagyobb, mint a táblázatosan megadott határérték az adatot kizárhatjuk.

Adatok száma	Határ érték
2	1.15
3	1.38
4	1.54
5	1.68
6	1.73
7	1.79
8	1.86
9	1.92
10	1.96
12	2.03

Adatok száma	Határ érték
15	2.13
19	2.22
20	2.24
25	2.33
30	2.39
35	2.45
40	2.50
50	2.58
75	2.71
100	2.80

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

97

Példa: Az alábbi táblázatban lévő 25 mért beütésszám közül a legmagasabb (32) és a legalacsonyabb adat (11) gyanús. Ki kell-e azokat zárni?

Sorszám	Bruttó beütés
1	15
2	24
3	20
4	17
5	26
6	19
7	11
8	13
9	22
10	17

Sorszám	Bruttó beütés
11	19
12	20
13	29
14	22
15	18
16	28
17	23
18	23
19	32
20	20

Sorszám	Bruttó beütés
21	18
22	19
23	14
24	30
25	24

1. lépés – a mintaátlag, a szórás meghatározása:

$$\bar{x} = 21 \quad s^2 = 28$$

2. lépés - CR számítása

$$CR_{32} = \frac{(32 - 21)}{\sqrt{21}} = 2,4$$

$$CR_{11} = \frac{(21 - 11)}{\sqrt{21}} = 2,2$$

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

98

3. lépés – számított CR értékek összehasonlítása a táblázat határértékeivel

A kritérium táblázat szerint 25 mérési adat esetén a CR határérték 2.33)

$CR_{32} = 2.4 > 2.33$, így a 32 eredményt ki kell zárni

$CR_{11} = 2.2 < 2.33$, így a 11 eredmény nem zárható ki

Általános szabályok mérési adatok kizárására

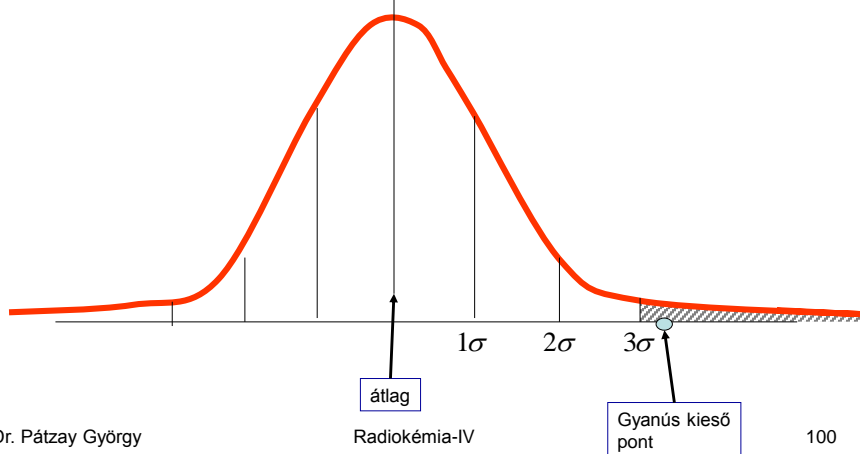
- Csak azért mert egy adat „rossznak tűnik” nem szabad kizárni.
- Csak megbízható és dokumentált eljárás alapján szabad adatot kizárni.
- Bármely adat kizárásánál maximális óvatossággal szabad eljárni

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

99

Ha a minta eléggé számos csak az átlagtól 3xszigma távolságon kívül elhelyezkedő adatok zárhatók ki, akkor, ha a hozzá tartozó valószínűség kellően kicsiny



Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

Gyanús kieső pont

100

A számlálási sebességet átszámíthatjuk a minta aktivitás értékévé, ha ismerjük a detektor számlálási hatásokát (ϵ), a minta előkészítés során kinyert radioaktivitás arányát (P), a sugárzás önabszorpciójának arányát (Ad) és a mérés során fellépő visszaszórás arányát (B):

$$A = \frac{\sqrt{\frac{\bar{I}_{bruttó}}{T_{bruttó}} + \frac{\bar{I}_{háttér}}{T_{háttér}}}}{\epsilon \cdot P \cdot Ad \cdot B}$$

Példa

Egy 32%-os hatásfokú detektorral 200 percig mérjük egy radioaktív minta beütésszámát, mely 3050 beütés. Mérünk egy 200 perces háttér is, az itt mért számlálási sebesség 10 cpm. A nettó számlálási sebesség és a szórása:

$$I = \frac{3050}{200} - 10 = 5,25 \text{ cpm}$$

$$s = +/- \sqrt{\frac{3050/200}{200} + \frac{10}{200}} = +/- 0,36 \text{ cpm}$$

A minta számított aktivitás pedig:

$$A = \frac{5,25 \pm 0,36 \text{ cpm}}{0,32 \text{ beütés/bomlás}} = 16,4 \pm 1,1 \text{ dpm} = 0,27 \pm 0,02 \text{ Bq} = 7,4 \pm 0,5 \text{ pCi}$$

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

101

Számlálási statisztika– precizitás

- A precizitás egy adott beütésszám mérés ismételhetőségét mutatja.
 - Mennyire esik közel az ismételt beütésszám mérés az előző mérési értékhez?
 - Mennyire esik közel egy mért beütésszám a számos ismételt mérésből meghatározott átlagértékhez?
 - Ha csak egy mérést végzünk, feltételezzük, hogy az eltér a sok mérésen alapuló mintaátlagtól.
- Annak a valószínűségét, hogy az egyes mérési eredmény egy adott határon belül mennyire közel esik az átlagértékhez a normális eloszlási görbéből határozhatjuk meg. Ha a számított, vagy mért érték N értékét vesszük átlagértéknek, akkor standard deviáció (s vagy σ) értékét ennek négyzetgyökével számítjuk:

$$s = \sqrt{N}$$

- Ebben az esetben 68% a valószínűsége annak, hogy az átlagérték, a mért érték $\pm 1s = \pm$ tartományán belül van.
- A százalékos hibát pedig a relatív szórás (V,CV) értékével jellemzzük:

$$\% \text{hiba} = \pm \frac{\sqrt{N}}{N} \times 100\%$$

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

102

Számlálási statisztika– precizitás

- A gyakorlatban mennyire jó a „jó mérési eredmény”?
 - A relatív szórás számítása mutatja, hogy növekvő beütésszámmal nő a mérés precizitása, azaz csökken relatív szórás.
 - A relatív szórás képlet szerint 68% annak a valószínűsége, hogy a valódi érték az egyedi mért érték \pm egy standard deviációs sávjában van. Más szóval a **68%-os konfidencia Intervallumban** található.
 - Ez a becslés általános esetben megfelelő precizitású.
- Nagyobb precizitású követelmények esetén a **95% konfidencia Intervallummal**

($\pm 1,96$ standard deviáció):

$$\% \text{hiba} = \frac{1.96 \sqrt{N}}{N} \times 100\%$$

- Kritikus esetben, **99%-os konfidencia intervallum** mellett

($\pm 2,58$ standard deviáció):

$$\% \text{hiba} = \frac{2.58 \sqrt{N}}{N} \times 100\%$$

Dr. Pátzay György

103

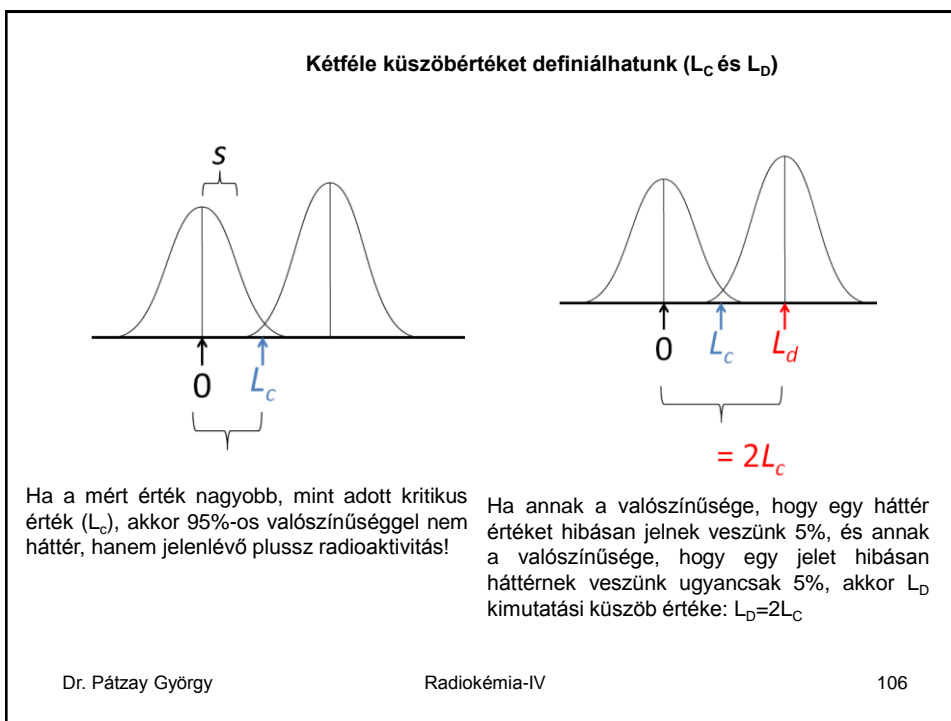
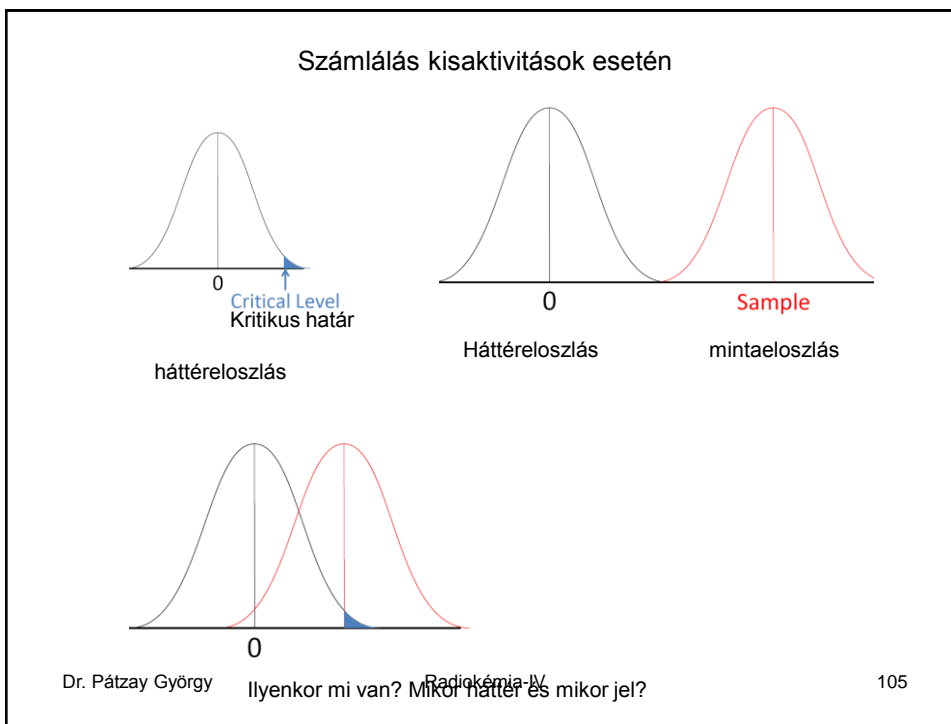
Számlálási statisztika– példa

Minta	konfidencia	Intervallum hiba becslés		
		68% k.i.	95% k.i.	99% k.i.
Measured Counts, N	\sqrt{N}	\sqrt{N} / N	$1.96 \sqrt{N} / N$	$2.58 \sqrt{N} / N$
20	4.5	0.224	0.438	0.577
50	7.1	0.141	0.277	0.365
100	10.0	0.100	0.196	0.258
200	14.1	0.071	0.139	0.182
1,000	31.6	0.032	0.062	0.082
5,000	70.7	0.014	0.028	0.036
10,000	100.0	0.010	0.020	0.026
40,000	200.0	0.005	0.010	0.013
70,000	264.6	0.004	0.007	0.010

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

104



Számlálás kisaktivitások esetén

A mérési gyakorlatban gyakran előfordul, hogy a mért beütések (N) száma, illetve a mért intenzitás (N/t) eléggé kicsiny és átlaguk közel esik a háttér átlagához (N_b , N_b/t). Felmerül a kérdés mikor és mekkora hibával mondhatjuk, hogy a mérések átlaga eltér a háttér átlagától jelentősen és nem háttér, hanem valós jel?

Ennek eldöntésére két jellemzőt használhatunk, a **detektálási szintet** (decision level, detection level) $DL=L_c$ értékét, vagy a **kimutatási határt** (detection level, Lower Limit of detection) $LLD=L_D$ értékét. Mindkettő megadható beütésszámként (N), mért intenzitásként ($I=N/t$), illetve aktivitásként (A) is. L_c értéke a mért adatot minősíti, míg L_D értéke a mérőberendezést.

L_c alkalmazása

Mért beütésszám, intenzitás minősítéséhez alkalmazzuk. Ha a háttérrel korrigált nettó beütésszám értéke 95%-os megbízhatósággal kisebb, mint L_c értéke, 5%-os hiba mellett megállapíthatjuk, hogy háttérrel mértünk és nincs jelen valódi sugárforrás.

$$N_{\text{netto}} < L_c \text{ a mért beütésszám háttér}$$

$$N_{\text{netto}} > L_c \text{ a mért beütésszám valós jel}$$

L_D alkalmazása

Bár a mérőkészülék által még éppen detektálható érték meghatározására szolgál (kimutatási határ), de viszonyítható egy mért értékhez is,

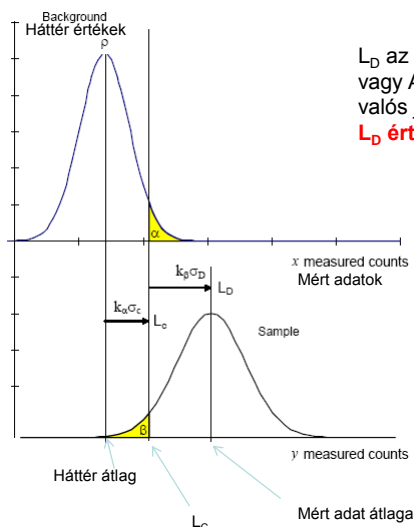
$$N_{\text{netto}} < L_D \text{ a mért beütés már jelként nem mutatható ki}$$

$$N_{\text{netto}} > L_D \text{ a mért beütésszám detektálható valós jel}$$

Dr. Pátzay György

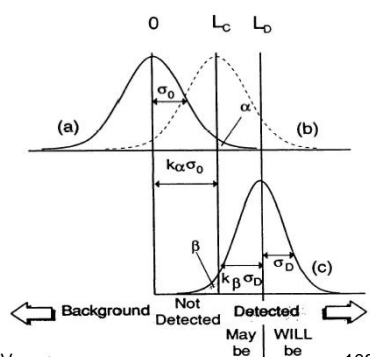
Radiokémia-IV

107



L_D az a minimális L_c fölött lévő beütésszám (vagy I, vagy A), melynél annak a valószínűsége, hogy nem valós jelként értékeljük 5%.

L_D értéke általában L_c kétszerese: $L_D=2L_c$



Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

108

L_C , L_D , MDA, MDC

Ha a háttérmérés átlagához közeleső, nullánál nagyobb beütésszámokat mérünk, felmerül a kérdés, ha nincs valódi radioaktív sugárforrás jelen és a mért beütésszámot hibásan jelnek vesszük (elsőfajú hiba), illetve ha valódi radioaktív sugárforrás van jelen és a mért beütésszámot hibásan háttérként értékeljük (másodfajú hiba), hogyan tudjuk ezen hibák előfordulási valószínűségét csökkenteni? Az első esetben az L_C kritikus detektálási szint (mért intenzitás!), a második esetben L_D minimálisan kimutatható (szignifikáns) aktivitási szint (mért intenzitás!), paraméterek használhatók fel. Ha a két hiba előfordulási valószínűsége azonos és a háttér értéke nem ismert, L_C , és L_D értéke számítható:

$$L_C = k \cdot \sigma_{\text{háttér}}$$

$$L_D = k^2 + 2k \cdot \sigma_{\text{háttér}}$$

Ha 5% az elsőfajú és 5% a másodfajú hiba elkövetési valószínűsége, azaz 95%-os a megbízhatóság (konfidencia), akkor a normális eloszlás szerint $k=1,645$ és L_C , valamint L_D értéke:

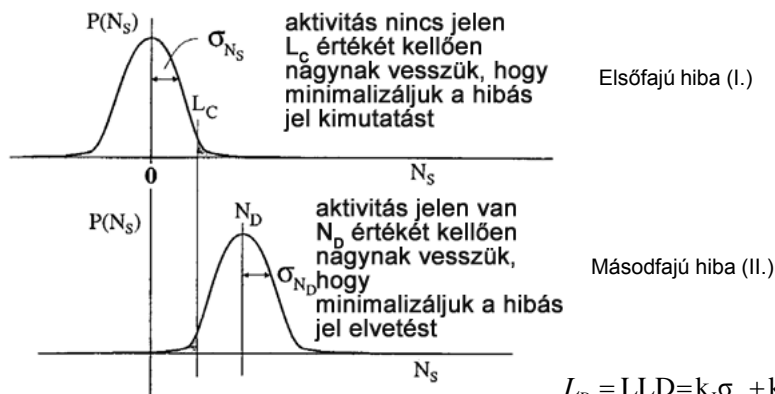
$$L_C = 1,645 \cdot \sqrt{\frac{I_{\text{háttér}}}{t_{\text{háttér}}} + \frac{I_{\text{háttér}}}{t_{\text{brutó}}}}$$

$$L_D = 2,71 + 3,29 \cdot \sqrt{\frac{I_{\text{háttér}}}{t_{\text{háttér}}} + \frac{I_{\text{háttér}}}{t_{\text{brutó}}}}$$

k - az első és másodfajú hiba valószínűségeihez tartozó szigma száma
Dr. Pátzay György (95%)-esetén 1,645

Radiokémia-IV

109



$$N_s = N_T - N_B$$

N_s = nettóbeütésszám

N_T = bruttóbeütésszám

N_B = háttérbeütésszám

$$L_D = LLD = k_I \sigma_n + k_{II} \sigma_n$$

vagy

$$L_D = LLD = (k_I + k_{II}) \sigma_n$$

Ha $k_I = k_{II} = k$

$$LLD = 2k \cdot \sigma_{\text{háttér}}$$

95% konfidenci szintnél $k = 1,645$

$$LLD = 4,65 \cdot \sigma_{\text{háttér}}$$

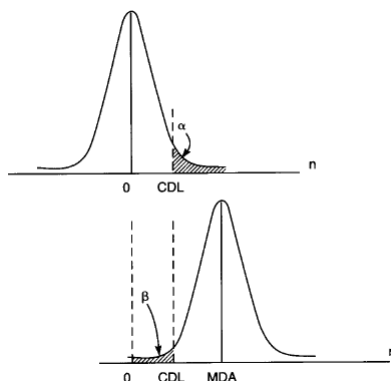
$$\sigma_{N_s}^2 = \sigma_{N_T}^2 + \sigma_{N_B}^2$$

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

$$LLD = 4,65 \cdot \sigma_{\text{háttér}}$$

110



A kritikus detektálási határ (CDL) és a minimálisan detektálható aktivitás elhelyezkedése és az I-fajú hiba (α) és a II-od fajú hiba (β) konfidencia határok

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

111

Az L_D értéke az előzetesen becsült minimális szignifikáns aktivitás értéke, melyet a készülék 100 esetben 95-ször nettó beütésszámként detektál és 5%-ban hibásan háttérnek tekint. Ez a készülék detektálási lehetősége. Az L_D 95%-os megbízhatósága mellett a kritikus detektálási határ, L_C valószínűsége 5%, azaz 100 mérésből 5 esetben a sugárforrás hiányában mért értéket jelnek veszi. L_C értékét közvetlen mérések esetén kell alkalmazni. Bármilyen mért jel e fölött jelnek tekinthető.

Ha a minta bruttó beütésszám és a háttér beütésszám mérési ideje egyezik, azaz $t_{\text{háttér}} = t_{\text{bruttó}} = t$, akkor a kifejezések egyszerűsödnek:

$$L_C = 2,32 \cdot \sqrt{\frac{J_{\text{háttér}}}{t}} \quad (1,645 \cdot 2^{0,5} = 2,32)$$

$$L_D = 2,71 + 4,65 \cdot \sqrt{\frac{J_{\text{háttér}}}{t}} \quad (3,29 \cdot 2^{0,5} = 4,65)$$

A kritikus detektálási küszöb (L_C) értékét sugárszint mérésnél alkalmazzuk, ha mért érték ennél nagyobb, akkor a minta radioaktív 95%-os megbízhatósággal.

A minimális szignifikáns aktivitási szint, vagy detektálási küszöb (LLD-Lower Limit of Detection), vagy minimálisan detektálható aktivitás (MDA-Minimum Detectable Activity) értékét a minta mérése előtt, a priori határozzuk meg. Általában kibocsátási határok méréséhez szükséges minimális mérési idő meghatározásához használják.

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

112

$L_D = LLD$ értékéhez két 95%-os konfidenciaszint kapcsolódik:

1. 5% kockázata annak, hogy sugárforrás hiányában is nettó beütésszámot kapjunk
2. 5% kockázata annak, hogy az LLD értékével azonos beütésszámot hibásan háttérnek tekintjük

Tehát az LLD két 95%-os konfidenciaszintet kapcsol össze!!!

Példa: Háttérrel mértek 50 percig és 16 beütést kaptak. Számítsa ki 0,5 perces mintamérési idő esetére a kritikus detektálási határt (L_C) és a minimális szignifikáns aktivitás szintet (L_D) cpm-ben.

$$L_C = 1.645 \sqrt{\frac{0.32}{50} + \frac{0.32}{0.5}}$$

$$L_C = 1.645 \sqrt{0.0064 + 0.64}$$

$$L_C = 1.645 \sqrt{0.6464}$$

$$L_C = 1.32 \text{ cpm}$$

$$L_D = 2.71 + 3.29 \sqrt{\frac{0.32}{50} + \frac{0.32}{0.5}}$$

$$L_D = 2.71 + 3.29 (0.804)$$

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

113

L_D minimálisan detektálható szignifikáns aktivitási szint mért intenzitásban (cps, cpm) adja meg a kritikus értéket. Ennek ismeretében a minimálisan detektálható szignifikáns aktivitás (MDA, Bq-ben) is számítható a detektálási hatásfok (ϵ), a minta előkészítés során kinyert radioaktivitás aránya (P), a sugárzás önabszorpciójának aránya (Ad) és a mérés során fellépő visszaszórás aránya (B) ismeretében. Általában P, Ad és B paraméterek értéke 1 és az aktivitás számításához csak a detektálási hatásfok szükséges. MDA számítható így különböző háttér és mintamérési idők esetén:

$$MDA(Bq) = \frac{2,71 + 3,29 \cdot \sqrt{\frac{I_{\text{háttér}}}{t_{\text{háttér}}} + \frac{I_{\text{háttér}}}{t_{\text{bruttó}}}}}{\epsilon}$$

Ha a két mérési idő egyezik, azaz $t_{\text{háttér}} = t_{\text{bruttó}} = t$, akkor:

$$MDA(Bq) = \frac{2,71 + 4,65 \cdot \sqrt{\frac{I_{\text{háttér}}}{t}}}{\epsilon \cdot t}$$

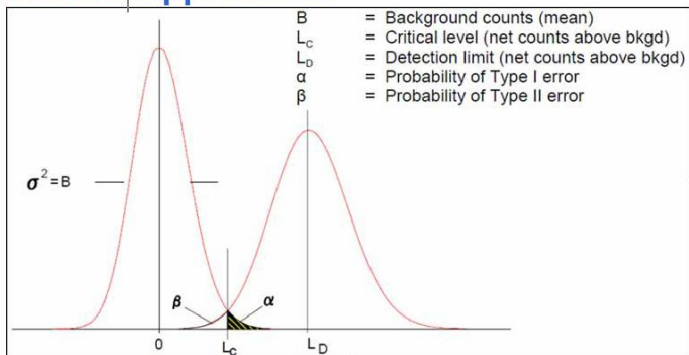
MDA ismeretében számítható a minimális detektálható koncentráció (MDC) értéke is, ha MDA értékét elosztjuk a minta tömegével, vagy térfogatával.

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

114

MARSSIM's Approach...



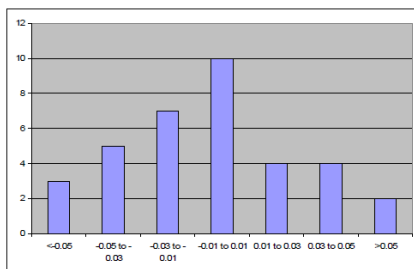
- L_C – level above which something has been identified inconsistent with background
- L_D – Level at which something will be reliably identified as present

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

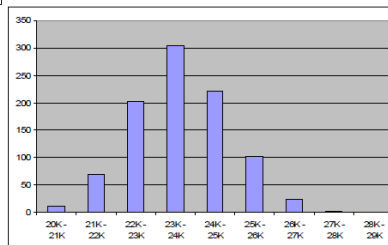
115

Example Data Sets...



- 36 background samples analyzed for Am-241
- average: -0.003 pCi/g, stdev: 0.041 pCi/g
- using a 3 standard deviation rule, the L_C in this case would be 0.123 pCi/g, and the L_D would be 0.246 pCi/g

- 938 measurements from a background area
- average: 23.6K cpm; stdev: 1.2K cpm
- using a 3 standard deviation rule, the L_C in this case would be 27.2K cpm, and the L_D would be 30.8K cpm



April 2011 | Argonne National Laboratory, USA

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

116

További információ (nem kötelező)

A detektálási küszöbértékeket a háttér számlálási sebességével fejezhetjük ki. A *minimális detektálható aktivitás* értékét (minimum detectable activity-MDA) a minta beütésszám mérési idejével azonos ideig mért háttér beütésszám szórásának háromszoros értékével fejezzük ki. Az MDA értéknél magasabb mért beütésszám 99,9%-os konfidencia szinten állapítja meg, hogy ez a beütésszám valószínűleg radioaktivitást fejez ki.

$$MDA = \gamma \cdot 3 \cdot s_{\text{háttér}} = \gamma \cdot 3 \sqrt{\frac{N_{\text{háttér}}}{T_{\text{háttér}}^2}} = \gamma \cdot 3 \sqrt{\frac{I_{\text{háttér}}}{T_{\text{háttér}}}}$$

ahol γ korrekciós tényező ($\gamma = \frac{1}{(\varepsilon \cdot P \cdot Ad \cdot B)}$)

A detektálási küszöb pontosabban definiálható, melyben figyelembe vesszük annak a kockázatnak a valószínűségét, hogy jelet detektálunk amikor nincs jel (elsőfajú hiba) és annak a kockázatnak a valószínűségét is, hogy nem detektálunk jelet, amikor pedig van jel (másodfajú hiba).

Definiálták a *minimálisan szignifikáns aktivitást* (*minimum significant activity, MSA*) és a *minimálisan detektálható valódi aktivitást* (*minimum detectable true activity, MDTA*). Az első jellemző az olyan mérésre vonatkozik, melyben nullánál nagyobb aktivitás értéket tudunk mérni, a második pedig arra a valódi aktivitás minimumra vonatkozik, melyet még adott konfidencia szinten detektálni tudunk. Két lehetséges mérési helyzet lehetséges: az első esetben a háttér beütésszám értékét előzetesen pontosan ismerjük, a második esetben ennek pontos értéke előre nem ismert. A legtöbb mérő berendezésre az első eset alkalmazható. Az első esetre definiálható MSA és MDTA értéke, mint:

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

117

$$MSA = \gamma \cdot K \cdot \sqrt{\frac{I_{\text{háttér}}}{T_{\text{háttér}}}} \quad \text{és} \quad MDTA = \gamma \cdot \sqrt{\frac{I_{\text{háttér}}}{T_{\text{háttér}}}} [K_A + K_B \cdot \sqrt{1 + \frac{K_A}{\sqrt{I_{\text{háttér}} \cdot T_{\text{háttér}}}} + \frac{K_B^2}{4I_{\text{háttér}} \cdot T_{\text{háttér}}} + \frac{K_A^2}{2\sqrt{I_{\text{háttér}} \cdot T_{\text{háttér}}}}}]$$

$$\text{ha } \frac{K_A + K_B}{\sqrt{I_{\text{háttér}} \cdot T_{\text{háttér}}}} \ll 1 \text{ akkor } MDTA \approx \gamma \cdot (K_A + K_B) \cdot \sqrt{\frac{I_{\text{háttér}}}{T_{\text{háttér}}}}$$

ahol K_A értéke az elsőfajú hiba elkövetésének valószínűségétől, K_B értéke pedig a másodfajú hiba elkövetésének valószínűségétől függő érték, melyeket normális valószínűségi eloszlás esetére a következő táblázatban mutatunk be.

Annak a valószínűsége, hogy elkerüljük az elsőfajú és/vagy másodfajú hibát (%)	K_A és/vagy K_B értéke
99.9	3.00
99.0	2.33
97.5	1.96
95.0	1.64
90.0	1.28

Ha a hibás aktivitás mérés elkerülésének valószínűsége 99,9%, akkor $K_B=3$ és MSA értéke megegyezik MDA értékével.

Dr. Pátzay György

Radiokémia-IV

118

Példa

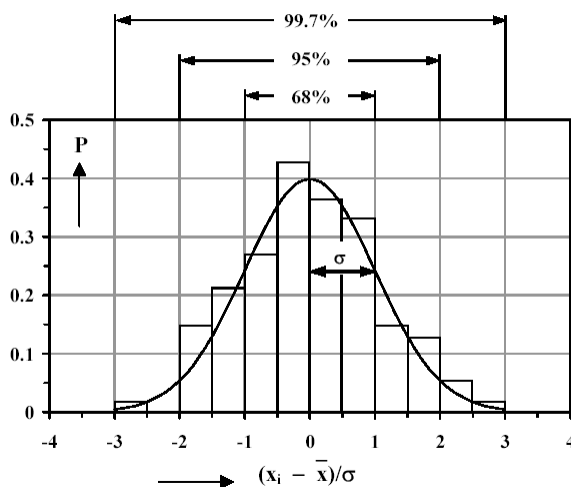
Az előző példa adatai alapján:
$$MBA = 3 \left(\frac{1 \text{ Bq} / 60 \text{ dpm}}{0,32 \text{ beütés / bomlás}} \right) \sqrt{\frac{10 \text{ cpm}}{200 \text{ min}}} = 0,03 \text{ Bq}$$

Ha úgy az elsőfajú, mint a másodfajú hiba elkerülésének valószínűségét 97.5%-nak választjuk, akkor $K_A=K_B=1,96$ akkor MSA értéke:

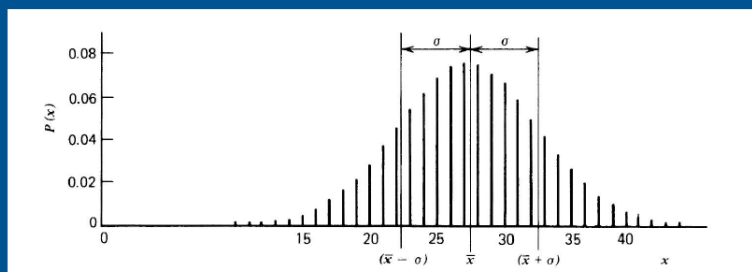
$$MSA = 1,96 \left(\frac{1 \text{ Bq} / 60 \text{ dpm}}{0,32 \text{ beütés / bomlás}} \right) \sqrt{\frac{10 \text{ cpm}}{200 \text{ min}}} = 0,02 \text{ Bq}$$

Mivel pedig: $\frac{1,96 + 1,96}{\sqrt{(10 \text{ cpm})(200 \text{ min})}} = 0,088 \ll 1$ így MDTA értéke:

$$MDTA = (1,96 + 1,96) \left(\frac{1 \text{ Bq} / 60 \text{ dpm}}{0,32 \text{ beütés / bomlás}} \right) \sqrt{\frac{10 \text{ cpm}}{200 \text{ min}}} = 0,05 \text{ Bq}$$



Confidence Intervals



Interval about measurement	Probability that mean is within interval (%)
$\pm 0.674\sigma$	50.0
$\pm 1.0\sigma$	68.3
$\pm 1.64\sigma$	90.0
$\pm 1.96\sigma$	95.0
$\pm 2.58\sigma$	99.0
$\pm 3.0\sigma$	99.7

A Summary of Units and quantities for radioactivity and dose of radiation.

Quantity	Symbol	SI unit	Cgs unit	Conversion factors
Activity	A	Bq	Ci, dps	1 Bq = 1 dps; 1 Ci = 3.7×10^{10} Bq
Exposure dose	X	C/kg	R	1 C kg ⁻¹ = 3876 R
Absorbed dose	D	Gy (J/kg)	rad	1 Gy = 100 rad = 6.24×10^{15} eV/g
Equivalent dose QD	H	Sv (Q*Gy)	rem	1 Sv = 100 rem

Abbreviations: Bq, becquerel; Ci, curie; C, coulomb; R, roentgen; Gy, gray; Sv, sievert; dps disintegration per second (After Tabata, 1991).

1 Gy = 100 rad
1 Sv = 100 rem
1 Sv = $Q \times 1$ Gy
1 rem = $Q \times 1$ rad

Modifiers of the unit curie (Ci = 3.7×10^{10} Bq)

MCi	Megacurie	10^6 Ci
KCi	Kilocurie	10^3 Ci
mCi	millicurie	0.001 Ci
μCi	Microcurie	37,000 Bq
nCi	Nonocurie	37 Bq
pCi	Picocurie	0.037 Bq