

Detekcia a meranie ionizujúceho žiarenia 2

10. mája 2019

doc. Ing. Róbert Hinca, PhD.



Fyzikálne procesy používané na detekciu IŽ

Mechanizmus	Použitie	Typ zariadenia	Typ detektora
Ionizácia IŽ môže priamo (α, β) alebo nepriamo (γ, X, n) ionizovať prostredie detektora	Monitorovanie radiácie	1. Ionizačné komory 2. Proporcionálne p. 3. GM počítace 4. Polovodičové det.	1. plynné 2. plynné 3. plynné 4. pevná látka
Scintilácia Záblesky svetla pri deexcitácii atómov v detekčnom kryštále sú konvertované na elektrický signál vo fotonásobiči.	Monitorovanie radiácie	scintilčné detektory	kryštál alebo tekutá látka
Termoluminiscencia Elektróny sú v TLD kryštáloch zachytené v pasciach po excitácii žiarením. Vyslobodenie z pasce sa deje prostredníctvom dodania tepla za emisie fotónov svetla, ktoré sa registrujú fotonásobičom.	Osobná dozimetria	TLD dozimeter	kryštál
Chemické reakcie Žiarenie môže spôsobiť resp. urýchliť niektoré chemické reakcie. Vyhodnotenie chemických zmien môže dať informáciu o absorbovanej dávke.	Osobná dozimetria	fotografický film Železnatý roztok $\text{Fe}^{2+} + \text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{OH}^-$	Fotoemulzia Frickeho dozimeter
Ohrev Ionizujúce žiarenie pri interakcii odovzdáva energiu absorpcnému prostrediu, ktoré za tým zohrieva. Ohrev je proporcionálny absorbovanej dávke.	Kalibrácia meracích prístrojov a štandardov	kalorimeter	tekutá alebo pevná látka
Biologické zmeny Žiarenie spôsobuje zmeny v biologickom tkanive (frekvencia chromozómových aberácií), ktoré môžu byť za určitých okolností využité na určenie dávky	Havarijná situácia	biologické tkanivo	biologické tkanivo

Základné procesy pri detekcii žiarenia

Primárne častice	Proces interakcie	Nabité priamo ionizujúce častice
α - častice	ionizácia a excitácia Coulombovskými silami	primárne častice a sekundárne elektróny
β - častice	ionizácia a excitácia Coulombovskými silami	primárne a sekundárne elektróny
	emisia brzdného žiarenia	elektróny z interakcie brzdného žiarenia
fotóny γ a X	fotoelektrický jav	fotoelektróny
	Comptonov rozptyl	Comptonove elektróny
	tvorba párov e^- a e^+	vzniknuté páry e^- a e^+
	koherentný rozptyl	-
neutróny	fotojadrová reakcia	produkty reakcie
	pružný rozptyl	odrazené jadrá (ľahké)
	nepružný rozptyl	odrazené jadrá a elektróny po interakcii vzniknutých fotónov
	radiačný záchyt (n, γ)	elektróny po interakcii vzniknutých fotónov
	jadrové reakcie (n, α), (n, p)...	nabité produkty reakcií
	štiepenie jadier	štiepne fragmenty

Základné parametre meradiel IŽ

- citlivosť,
- účinnosť,
- časové rozlíšenie (mŕtva doba),
- energetické (amplitúdové) rozlíšenie,
- selektivita,
- vlastný šum,
- veľkosť a polarita výstupného signálu a
- stabilita
- energetický rozsah – od MDA do maximálnej merateľnej aktivity.

Citlivosť – sensitivity

referenčná odozva na radiáciu
reference radiation response

- **Citlivosť** detektora je vzťah medzi výsledným meraným údajom detektora (napr. amplitúdou impulzov) a určitým parametrom ionizujúceho žiarenia (napr. energiou častice). Citlivosť ako veličina má rozmer, ktorý závisí od druhu meracieho prístroja (radiametrický, dozimetrický) a podmienok merania.

I_{rp} - je údaj v dôsledku konvenčne pravej aktivity referenčného zdroja a pozadia,

I_b - údaj výlučne od pozadia,

A_t - konvenčne pravá aktivita referenčného zdroja.

- A/Bq
- $s^{-1}/(Bq/cm^2)$

$$R_{ref} = \frac{I_{rp} - I_b}{A_t}$$

sensitivity vs. efficiency

● sensitivity

for a given value of the measured quantity, ratio of the variation of the observed variable to the corresponding variation of the measured quantity
Example: sensitivity is the ratio between the net true count rate and the activity of radiation source. This sensitivity depends on the nature of the radiation issuing radionuclide.

● detector efficiency

ratio of the number of detected photons to the number of photons of the same type which are incident on the detector in the same time interval

Účinnosť (intrinzická-vnúťorná)

- **Účinnosť** detektora - udáva pravdepodobnosť registrácie jednotlivých častíc.
- Je to podiel počtu zaregistrovaných impulzov k počtu častíc, ktoré sa dostali do citlivého objemu detektora, nazývame, prelietavajúcej cez detektor.
- Účinnosť je teda veličina bezrozmerná teda v %.

Relatívna účinnosť gamaspektrometrického detektora

Vyjadruje sa v percentách k referenčnej hodnote, ktorá je stanovená pre 3" NaI(Tl), 1,33 MeV fotóny etalónu CO-60 bodového zdroja umiestneného 25 cm od povrchu detektora (0,0012).

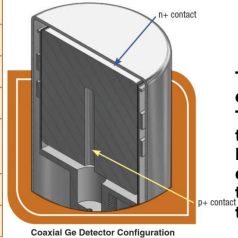
Model No.	Endcap Size (mm)	CFG	Serial No.	Relative Eff. (%) @ 1.33 MeV	FWHM @ 1.33 MeV
GEM10P4-70	70	PT	TP13723A	12	1.75
GEM10P4-70	70	PT	TP23839C	14	1.75
GEM10P4-70	70	PT	TP23837B	13	1.54
GEM10P4-70	70	PT	TP23835A	15	1.57
GEM10P4-70	70	PT	TP23826B	11	1.69
GEM15P4-70	70	PT	TP51363B	16	1.74
GEM25P4-76	76	PT	TP23894A	32	1.67
GEM30P4-76-PL-ST	76	PT	TP13710B	34	1.84
GEM35-83	83	GG	P33062B	37	1.78
GMX20P4-70-SMN	70	PT	TN33429B	24	1.79
GMX30P4-70-ST	70	PT	TN13202A	31	2.05
GMX35P4-76	76	PT	TN51290A	35	1.91
GMX60-83-CW-HJ-S	83	HJ	N33423A	60	2.3
GEM-S7025P4	83	PT	TP50873A	19	1.86
GEM-SP5825P4	70	PT	TP13485A	13	1.67
SGD-GEM-5030P4-SMP	70	PT	TP23830A		1.70
GLP-16195/10P4	70	PT	TC1558		

Parametre detektorov HPGe od f. Canberra

Model Number	Relative Efficiency (%) ≥	Full Width Half Max (FWHM) Resolution (keV) At 122 keV energy	Peak to Compton Ratio (P/C) At 1.3 MeV energy	Peak Shape FWHM	Endcap diameter (mm) (in.)
GC0518	5	0.825	1.8	32	1.90 76 (3.0)
GC1018	10	0.825	1.8	38	1.90 76 (3.0)
GC1020	10	1.0	2.0	34	2.00 76 (3.0)
GC1518	15	0.825	1.8	44	1.90 76 (3.0)
GC1520	15	1.0	2.0	40	2.00 76 (3.0)
GC2018	20	0.850	1.8	50	1.90 76 (3.0)
GC2020	20	1.10	2.0	46	2.00 76 (3.0)
GC2518	25	0.850	1.8	54	1.90 76 (3.0)
GC2520	25	1.10	2.0	50	2.00 76 (3.0)
GC3018	30	0.875	1.8	58	1.90 76 (3.0)
GC3020	30	1.20	2.0	54	2.00 76 (3.0)
GC3518	35	0.925	1.8	60	1.90 76 (3.0)
GC3520	35	1.20	2.0	56	2.00 76 (3.0)
GC4018	40	0.925	1.8	62	1.90 76 (3.0)
GC4020	40	1.20	2.0	54	2.00 76 (3.0)
GC4518	45	0.950	1.8	62	1.90 83 (3.25)
GC4520	45	1.20	2.0	54	2.00 83 (3.25)
GC5019	50	1.00	1.9	64	1.90 83 (3.25)*
GC5021	50	1.20	2.1	56	2.00 83 (3.25)*
GC5519	55	1.00	1.9	64	1.90 89 (3.5)
GC5521	55	1.20	2.1	56	2.00 89 (3.5)
GC6020	60	1.05	2.0	66	1.90 89 (3.5)
GC6022	60	1.25	2.2	60	2.00 89 (3.5)

Model Number	Relative Efficiency (%) ≥	Full Width Half Max (FWHM) Resolution (keV) At 122 keV energy	Peak to Compton Ratio (P/C) At 1.3 MeV energy	Peak Shape FWHM	Endcap diameter (mm) (in.)
GC6520	65	1.05	2.0	68	1.90 89 (3.5)
GC6522	65	1.25	2.2	62	2.00 89 (3.5)
GC7020	70	1.05	2.0	70	1.90 89 (3.5)*
GC7022	70	1.25	2.2	64	2.00 89 (3.5)*
GC8021	80	1.10	2.1	72	1.90 95 (3.75)
GC8023	80	1.30	2.3	66	2.00 95 (3.75)
GC9021	90	1.10	2.1	76	1.90 95 (3.75)
GC9023	90	1.30	2.3	70	2.00 95 (3.75)
GC10021	100	1.20	2.1	80	1.90 95 (3.75)*
GC10023	100	1.40	2.3	74	2.00 95 (3.75)*

Model Number	Relative Efficiency (%) ≥	Full Width Half Max (FWHM) Resolution (keV) At 122 keV energy	Peak to Compton Ratio (P/C) At 1.3 MeV energy	Peak Shape FWHM	Endcap diameter (mm) (in.)
GC11021	110	1.20	2.1	80	1.90 102 (4.0)
GC11023	110	1.40	2.3	74	2.00 102 (4.0)
GC12021	120	1.30	2.1	80	1.90 102 (4.0)
GC12023	120	1.50	2.3	74	2.00 102 (4.0)
GC13021	130	1.30	2.1	80	1.95 108 (4.25)*
GC13023	130	1.50	2.3	74	2.00 108 (4.25)*
GC14022	140	1.30	2.2	80	1.95 108 (4.25)*
GC14024	140	1.50	2.4	74	2.00 108 (4.25)*
GC15022	150	1.30	2.2	80	1.95 108 (4.25)*
GC15024	150	1.50	2.4	74	2.00 108 (4.25)*



The useful energy range of the Coaxial Ge detector is 40 keV to more than 10 MeV. The n and p contacts, or electrodes, are typically diffused lithium and implanted boron respectively. The outer n-type diffused lithium contact is about 0.5 mm thick. The inner contact is about 0.3 μm thick.

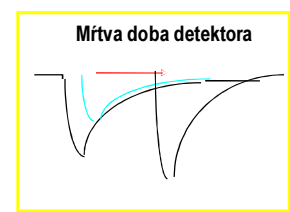
Mŕtva doba

Keď sa registrovaná častica dostáva do interakcie s detekčným prostredím, určitú dobu trvá, kým proces ionizácie prebehne, dôjde k rekombinácii, vytvorený elektrický náboj sa odvedie alebo vzbudené atómy sa vrátia do základného stavu.

Po túto dobu je detektor necitlivý k ďalším prichádzajúcim časticiam resp. nedokáže od seba oddeliť výstupné signály zodpovedajúcej kvality.

Mŕtva doba je minimálny časový interval, ktorý musí uplynúť medzi príchodom dvoch po sebe nasledujúcich častíc, aby boli zaregistrované oddelene a to je vlastne časové rozlíšenie detektora

Detektor	Mŕtva doba
Ionizačná komora	10^{-4}
Proporcionálny detektor	10^{-5}
GM detektor	10^{-4}
Scintilačný detektor	10^{-8}
Polovodičový detektor	10^{-9}



Postup pri stanovení mŕtvej doby metódou dvoch žiaričov

Na tento účel sú potrebné dva zdroje rádionuklidov o ktorých sa zaujímate, pričom aktivita každého je okolo 10 % ale nie viac, ako je maximálny rozsah zariadenia.

Najskôr meriame počet impulzov **pozadia** v príslušnom energetickom pásme. Nech je početnosť rovná B . Ďalej umiestnime jeden zo zdrojov do meracej polohy. Táto početnosť sa rovná C_1 . Vyjadríme čistú početnosť $n_1 = C_1 - B$

Ďalej umiestnite do meracej pozície ďalší zdroj tak aby nebola v žiadnom prípade ovplyvnená detekcia žiarenia z prvého zdroja a aby sa žiadnym spôsobom tento zdroj nerušil. Táto celková početnosť je C_{12} a $n_{12} = C_{12} - B$

Odstraníme prvý zdroj a zmeráme ďalšiu početnosť C_2 a $n_2 = C_2 - B$

Čas počítania impulzov musí byť taký, aby sme získali minimálne 10^5 impulzov zo zdrojov a 10^4 z pozadia (pokiaľ tento čas neprekročí 3000 s).

Mŕtva doba μ (s) keď C_1 , C_2 , C_{12} a B sú vyjadrené v s^{-1} sa vypočíta zo vzťahu:

$$\mu = \frac{C_1 + C_2 - C_{12} - B}{C_1^2 + C_2^2 - (C_{12}^2 + B^2)}$$

Iné vyjadrenie príkladu na mŕtvu dobu

- Vychádzame z nasledovných predpokladov:
- Ak detektor zaregistruje n ($=100 s^{-1}$) impulzov za sekundu a po registrácii každého bude detektor mŕtvy po dobu τ ($=10^{-4} s$) tak detektor bude citlivý iba $(1 - n\tau) = (1 - 0,01) = 0,99$ časť z doby merania.
- Detektor zaregistruje nižšiu početnosť $n = n_0(1 - n\tau) = 0,99n_0 s^{-1}$ v porovnaní s početnosťou dopadajúcich častíc n_0

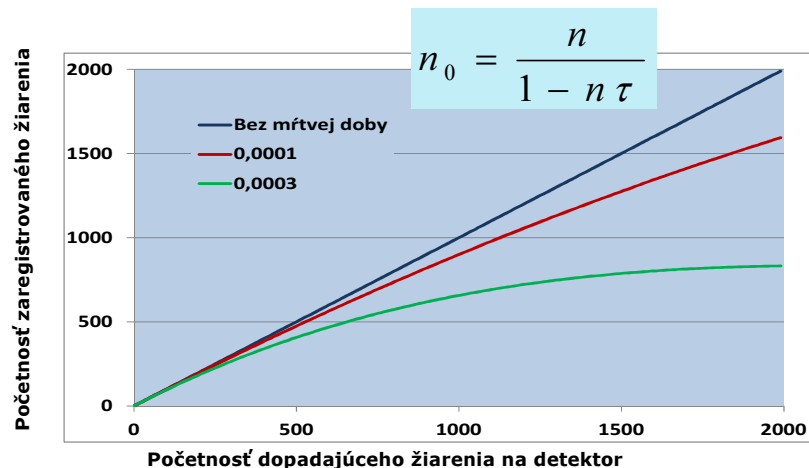
$$n_{01} = \frac{n_1}{1 - n_1\tau} \quad n_{012} = n_{01} + n_{02}$$

$$n_{02} = \frac{n_2}{1 - n_2\tau} \quad \frac{n_{12}}{1 - n_{12}\tau} = \frac{n_1}{1 - n_1\tau} + \frac{n_2}{1 - n_2\tau}$$

Za predpokladu $n_1\tau \ll 1$ a $n_2\tau \ll 1$ zanedbáme súčin $n_1n_2n_{12}\tau$ a dostaneme

$$n_{012} = \frac{n_{12}}{1 - n_{12}\tau} \quad \tau = \frac{n_1 + n_2 - n_{12}}{2n_1n_2}$$

Korekcia na mŕtvu dobu



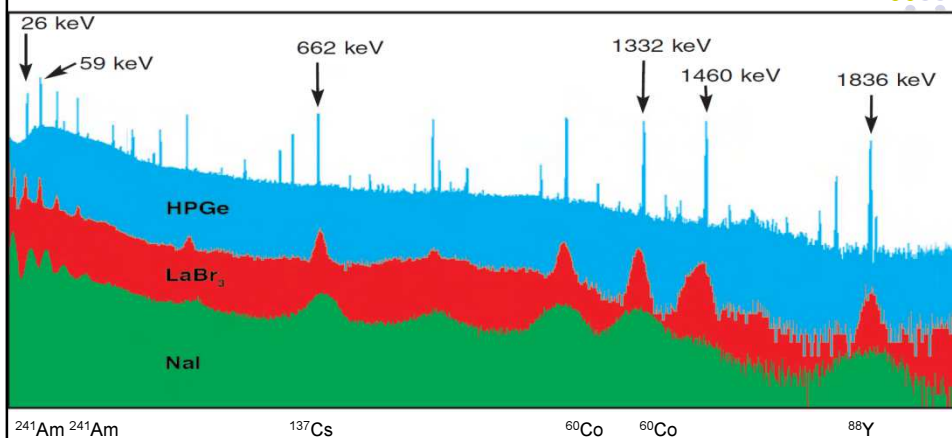
Energetická rozlišovacia schopnosť

Najdôležitejším parametrom **spektrometrického** detektora je jeho energetická rozlišovacia schopnosť.

Proces transformácie energie častice na amplitúdu impulzu má **pravdepodobnostný** charakter.

Preto ak aj je energia detekovaných častíc rovnaká, zodpovedajúce impulzy na výstupe detektora majú rôzne amplitúdy, t.j. amplitúdy sú rozdelené podľa určitého pravdepodobnostného zákona (**Gaussovo rozdelenia**).

Spektrá HPGe, LaBr₃ a NaI



Relatívne energetické rozlíšenie (relative energy resolution)

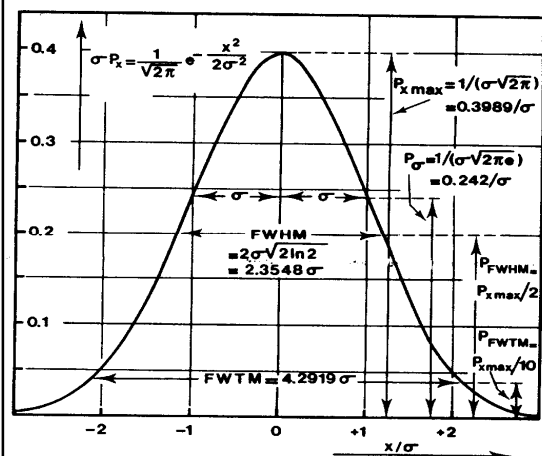
- FWHM - Full width at half maximum**
- úplná šírka medzi dvomi bodmi spektra umiestnenými na obidvoch stranách ťažiska energetickej oblasti o ktorú sa zaujímate, kde je početnosť (počet impulzov za sekundu) v energetickom kanále polovičná vzhľadom k maximu píku

$$\varepsilon_R = \frac{\text{úplná šírka vyjadrená v energii (alebo čísle kanála)}}{\text{energia (alebo číslo kanála) ťažiska energetického píku o ktorý sa zaujímate}}$$

$$R_E = \frac{\Delta E}{E_0}$$

Detektor	Rozlíšenie pre 662 keV	Hustota g/cm ³
LaBr ₃ (Ce)	2,8 - 4,0%	5,29
NaI(Tl)	7-10 %	3,7
HPGe	0,2 % (pre 1,3 MeV)	5,35

Energetické rozlíšenie R_E



$$R_E = \frac{\Delta E}{E_0}$$

Energetické rozlíšenie R_E je definované pomerom šírky piku ΔE , odmeranej v polovičnej výške piku k polohe maxima tohto piku E_0 .

V anglickej literatúre sa ΔE označuje **FWHM** – Full Width at Half Maximum

Príklad pre požiadavku energetického rozlíšenia spektrometrického prístroja

- Relatívne energetické rozlíšenie, pokiaľ sa týka FWHM prístroja založeného na **scintilačnom detektore** nesmie prekročiť 10% pre 661,7 keV gama čiaru cézia Cs-137 a musí byť uvedený výrobcom.
- Energetické rozlíšenie prístroja založeného na **germániovom polovodičovom detektore** nesmie prekročiť hodnotu FWHM 2% pre 661,7 keV gama čiaru cézia Cs-137 a nesmie prekročiť 4,0 keV pre 1,3325 MeV gama čiaru kobaltu Co-60 a musí byť uvedený výrobcom.

Selektivita

- Vhodnosť použitia detektora len pre určitý druh žiarenia sa posudzuje podľa jeho **selektivity**, ktorá udáva pomer citlivosti detektora pre registráciu požadovaného (skúmaného) druhu žiarenia k citlivosti detektora na ostatné druhy žiarenia.

Energetický rozsah – od MDA do maximálnej merateľnej aktivity

Minimálna detegovateľná aktivita

Stanovenie minimálnej detegovateľnej početnosti má byť urobené podľa STN ISO 11929. Pre každé jednotlivé meranie sa môže minimálna detegovateľná aktivita stanoviť zo vzťahu:

$$MDA = \frac{L_D}{\varepsilon}$$

kde ε je účinnosť detekcie (nie účinnosť detektora, správnejšie by bolo použiť citlivosť) pre meranie konkrétneho rádionuklidu v stanovenom orgáne, spravidla vyjadrená v početnosti na jednotkovú aktivitu ($s^{-1}Bq^{-1}$);

L_D (*limit of decision*) je detekčný limit vyjadrený v jednotkách početnosti (s^{-1})

! nie vždy sa na vyjadrenie MDA používa L_D

Energetický rozsah – od MDA do maximálnej merateľnej aktivity

Maximálne merateľná aktivita

Pre referenčný nuklid maximálna merateľná aktivita uvedená výrobcom musí byť taká, aby žiadna chyba spôsobená mŕtvou dobou v detekčnom systéme nevnesla chybu do merania väčšiu ako 10 %.

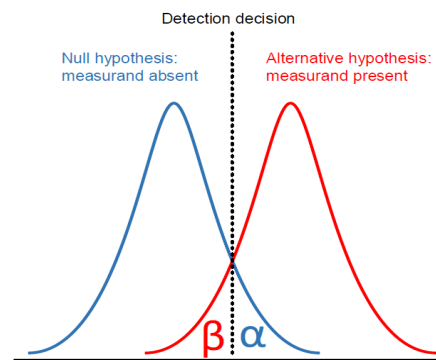
Ak dosadíme do $n = n_0(1 - n\tau)$ podmienku $n_0 = 1,1 \cdot n$ (detektor zaregistruje n , pričom dopadne n_0) dostaneme maximálnu početnosť v závislosti na mŕtvej dobe.

$$n_{\max} = \frac{0,1}{1,1 \cdot \tau} = \frac{0,0909}{\tau}$$

Pre GM detektory je $\tau = 10^{-4}$ a $n_{\max} = 909$ cps, čo pri účinnosti merania 10% (citlivosti $0,1 \text{ s}^{-1}\text{Bq}^{-1}$) predstavuje MDA = 9,09 kBq

Pre scintilačný detektor je $\tau = 10^{-8}$ a $n_{\max} = 9,09 \cdot 10^6$ cps, čo pri účinnosti merania 10% (citlivosti $0,1 \text{ s}^{-1}\text{Bq}^{-1}$) predstavuje MDA = 9,09 GBq

Errors in activity detection



• **Type I error (α)** False positive – The probability of falsely rejecting the null hypothesis that a substance is not present when it is actually present

• **Type II error (β)** False negative – The probability of falsely accepting the null hypothesis that a substance is absent, when in fact the substance is present at the designated concentration

Detekčný limit (Currie, 1968)

L_c the critical level: "net signal level (instrument response) above which an observed signal may be reliably recognized as detected. It is a decision limit at which one may decide whether or not the result of an analysis indicates detection."

L_D the detection limit: „the (true) net signal level which may be a priori expected at which a given analytical procedure may be relied upon to lead to detection".

L_Q the determination limit: "the level at which the measurement precision will be satisfactory for quantitative determination, a limit at which a given procedure will be sufficiently precise to yield a satisfactory quantitative estimate" (*limit of quantification*).

Currie, L. A. (1968) Limits for qualitative detection and quantitative determination. Anal. Chem. 40, 586—593.

Definície limitov

Critical Limit, L_c - the level above which an error is made if it is stated there is no detection (Limit of Blank, decision threshold);

$$L_c = k_c \cdot \sigma_b$$

Detection Limit, L_d - the level below which an error is made if it is assumed there is detection;

$$L_d = L_c + k_d \cdot \sigma_b$$

Quantification Limit, L_q - the level above which the signal is quantifiable;

$$L_q = k \cdot \sigma_v$$

Where

σ_b is the background uncertainty (= \sqrt{b} for 'paired' observations),

σ_v is the overall measurement uncertainty,

k_c, k_d are set to 'reasonable' risk levels (1,645 if 5%) and

$k=2$ is the measurement uncertainty coverage factor

Stanovenie MDA pre meradlá vnútornej kontaminácie in vivo (STN IEC 61582)

Pre každé jednotlivé meranie sa môže minimálna detegovateľná aktivita stanoviť zo vzťahu:

$$MDA = \frac{LLD}{\varepsilon}$$

kde ε je účinnosť detekcie pre meranie konkrétného rádionuklidu v stanovenom orgáne, spravidla vyjadrená ($s^{-1}Bq^{-1}$);

LLD (lower limit of decision threshold) je spodná hranica rozhodovacieho prahu vyjadrená v početnosti a je rovná:

$$LLD = \frac{1}{2t_0} k_{1-\alpha}^2 \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4R_b t_0}{k_{1-\alpha}^2} \left(1 + \frac{t_0}{t_b} \right)} \right]$$

kde R_b je početnosť pozadia,
 t_0 doba merania,
 t_b doba merania pozadia,
 $k_{1-\alpha}$ sú kvantily štandardného normálneho rozdelenia.

LLD (STN IEC 61582) vs. LD (Currie)

Za predpokladu že $t_0=t_b=t$ a t je dostatočne veľké ($1/t \rightarrow 0$)

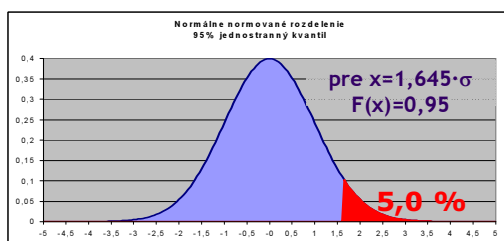
$$LLD = 2,326 \cdot \sqrt{\frac{R}{t}} = 2,326 \cdot \sigma_b$$

LD vypočítaná podľa Currieho:

$$n_D = 2,706 + 4,653 \cdot \sigma_b$$

Počet impulzov definovaný Currieho vzťahom predstavuje priemernú odozvu na minimálnu detegovateľnú aktivitu, ktorá zabezpečí pravdepodobnosť omylu deklarácie prítomnosti aktivity menšiu ako 5% ak je rozhodovacia úroveň nastavená na hodnotu $2,326 \cdot \sigma_b$. LLD je z tohto pohľadu totožné s Currieho L_C .

Normálne rozdelenie a jeho 95% jednostranný kvantil



$$L_C = 1,645 \cdot \sigma_n$$

pre meranie aktivity používame rozdiel nameranej hodnoty a pozadia

$$\sigma_n = \sqrt{\sigma_g^2 + \sigma_b^2} = \sqrt{2 \cdot \sigma_b^2} = \sqrt{2} \cdot \sigma_b$$

$$L_C = 1,645 \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma_b = 2,326 \cdot \sigma_b$$

Pravdepodobnosť, že normálne rozdelená náhodná premenná nadobudne hodnotu väčšiu ako $1,645 \cdot \sigma$ je menšia ako 5%. Pre náš prípad z toho vyplýva, že ak je reálne aktivita nulová, tak len s pravdepodobnosťou 5% bude výsledok merania viac ako $1,645 \cdot \sigma$. Preto ak je výsledkom merania hodnota väčšia ako $1,645 \cdot \sigma$, možno z toho usúdiť, že **aktivita nie je nulová**. Hodnota $1,645 \cdot \sigma$ predstavuje **kritickú úroveň – rozhodovací prah L_C** .

Rozhodovací prah L_C

	COUNTS	EXPECTATION VALUE	STANDARD DEVIATION
BACKGROUND	N_0	ν_0	$\sigma_0 = \sqrt{\nu_0}$
SAMPLE	N_s	ν_s	$\sigma_s = \sqrt{\nu_s}$
NET	$N_n = N_s - N_0$	$\nu_n = \nu_s - \nu_0$	$\sigma_n = \sqrt{\nu_s + \nu_0}$

α	K_α
0,1	1,28
0,05	1,64
0,025	1,96
0,001	3,09

$$N_n^* = k_\alpha \sigma_n \quad \sigma_n = \sqrt{2\nu_0}$$

$$\alpha = 0.05 \Rightarrow N_n^* = 2.32\sqrt{\nu_0}$$

$$\nu_n=0 \quad (\nu_s=\nu_0) \quad \sigma_n=(2\nu_0)^{1/2}$$

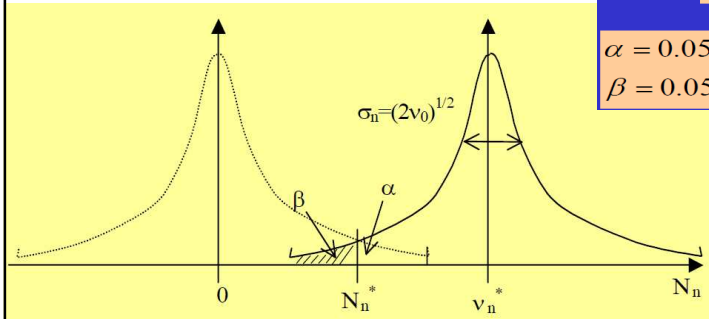
Detection limit L_D

$$v_n \neq 0 \quad (v_s > v_0) \quad \sigma_n = (2v_0)^{1/2}$$

α	K_α
0,1	1,28
0,05	1,64
0,025	1,96
0,001	3,09

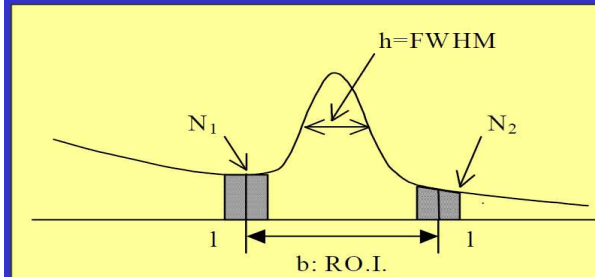
$$\sigma_n = \sqrt{2v_0}$$

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = 0.05 \\ \beta = 0.05 \end{array} \right\} \Rightarrow v_n^* = 4.64 \sqrt{v_0}$$



L_C a L_D v gama spektrometrii

	Counts	Count time	Count rate	Expectation value	Standard deviation
Background	N_0	t	R_0	v_0	σ_0
Gross peak area	N_s	t	R_s	v_s	σ_s
Net peak area	$N_n = N_s - N_0$	t	$R_n = R_s - R_0$	$v_n = v_s - v_0$	σ_n



$$N_n = N_s - N_0$$

$$N_0 = (N_1 - N_2) \frac{b}{2l}$$

$$b \geq 4 \text{ channels}$$

$$b \leq 2l \leq 10b$$

$$N_n = N_s - (N_1 + N_2) \frac{b}{2l}$$

$$\text{var}(N_n) = N_s + \frac{b}{2l} N_0$$

$$\text{var}(\rho_n) \big|_{\rho_n=0} = \frac{N_0}{t^2} \left(1 + \frac{b}{2l}\right)$$

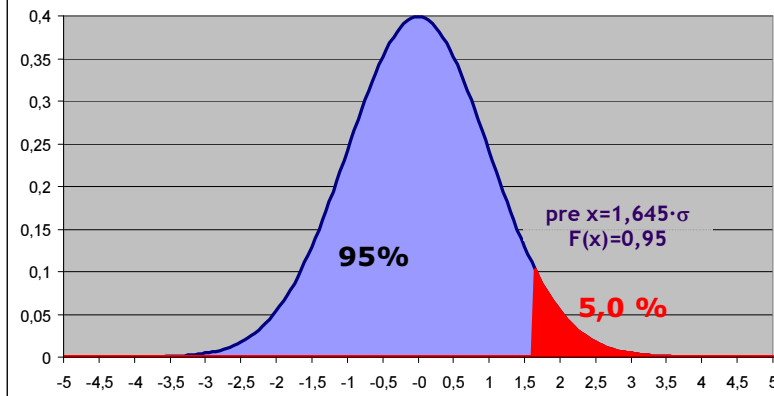
$$R_n^* = k_{1-\alpha} \sqrt{\frac{R_0}{t} \left(1 + \frac{b}{2l}\right)}$$

$$\rho_n^* = (k_{1-\alpha} + k_{1-b}) \sqrt{\frac{R_0}{t} \left(1 + \frac{b}{2l}\right)}$$

$$1 < 1 + \frac{b}{2l} < 2$$

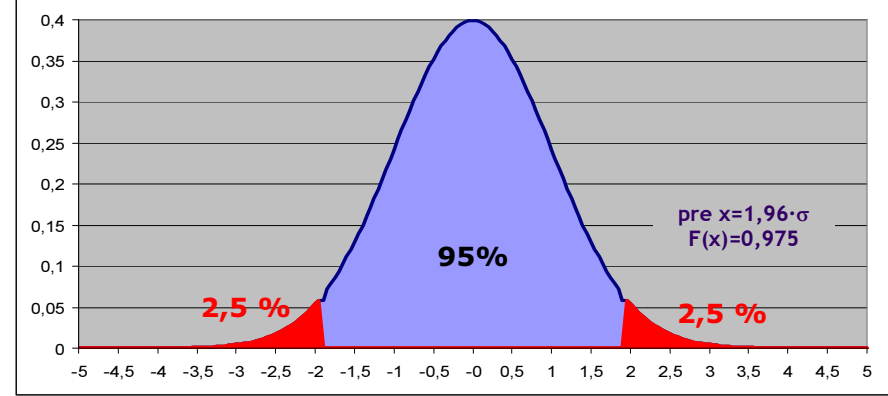
Kvantily

Normálne normované rozdelenie
95% jednostranný kvantil

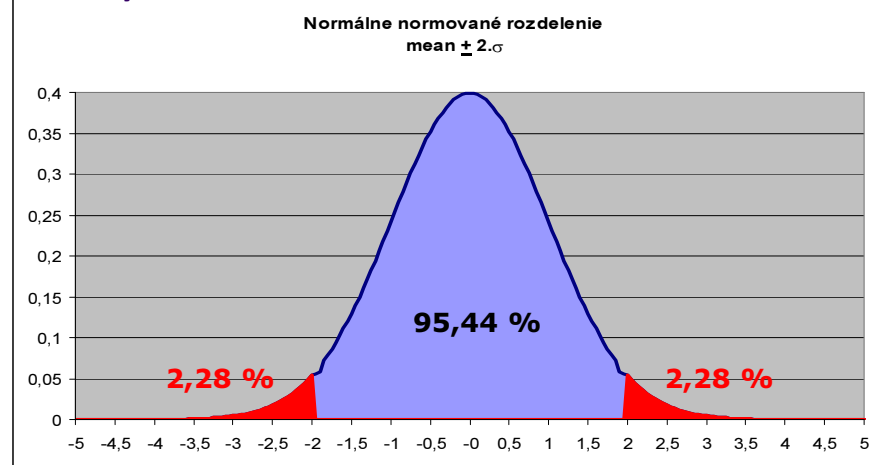


Kvantily

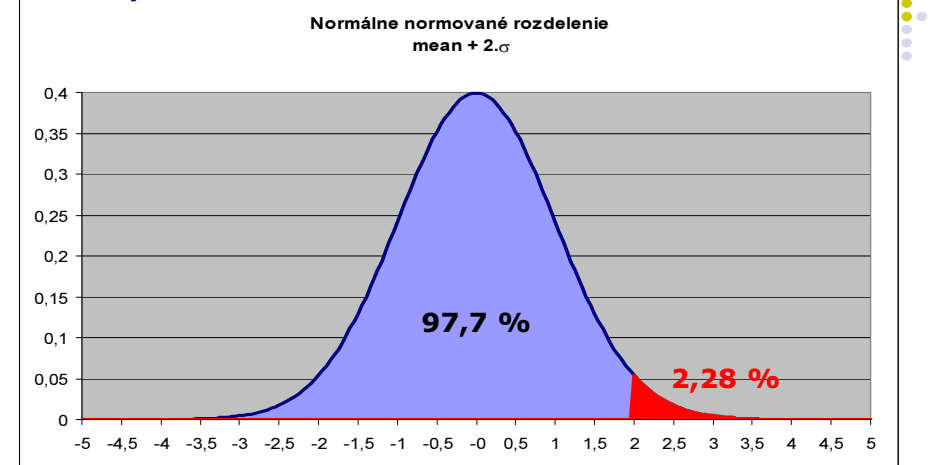
Normálne normované rozdelenie
95% obojstranný kvantil



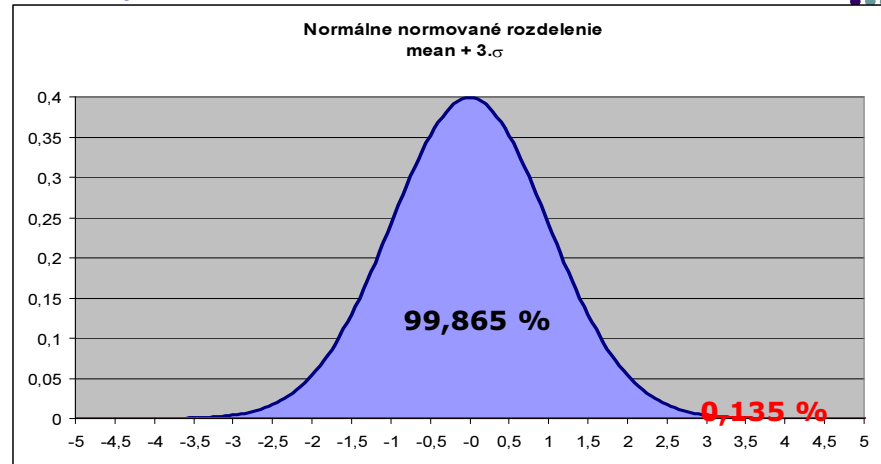
Kvantily



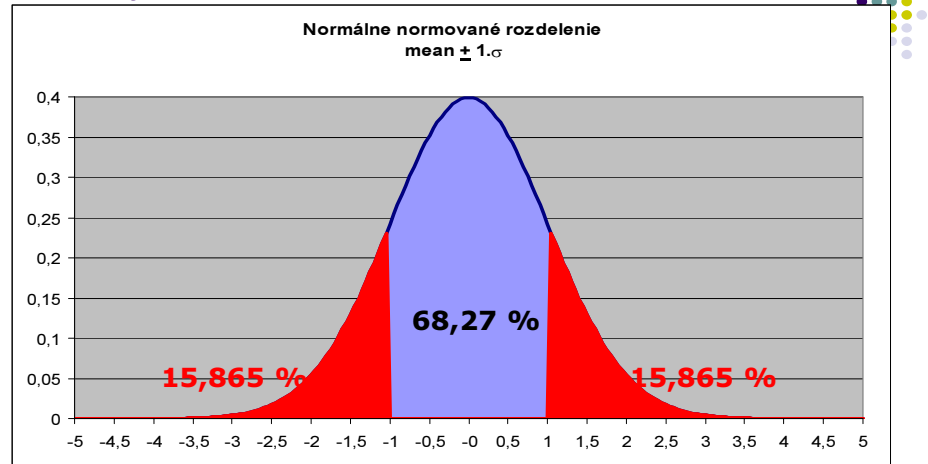
Kvantily



Kvantily



Kvantily



Kvantil

Kvantil x_p resp. p -kvantil ($p \cdot 100\%$ kvantil) náhodnej premennej je taká hodnota tejto premennej, pre ktorú platí.

$$P(X \leq x_p) = p \quad 0 \leq p \leq 1$$

V prípade spojitej náhodnej premennej, p -kvantil dostaneme ako hodnotu, v ktorej pre distribučnú funkciu platí.

$$F(x_p) = \int_{-\infty}^{x_p} f(x) dx = p$$

Jednostranné kvantily normálneho rozdelenia					
$1-\alpha$	0,9	0,95	0,975	0,99	0,995
$k_{1-\alpha}$	1,2816	1,6449	1,9600	2,3263	2,5758

Dvojstranné kvantily, konfidenčný interval

Dvojstranné kvantily normálneho rozdelenia

$1-\alpha$	0,6827	0,9	0,95	0,9545	0,99	0,995	0,9973
$k_{1-\alpha}$	1	1,6449	1,960	2	2,3263	2,5758	3

Rozdelenie pravdepodobnosti	Koeficient rozšírenia k_p		
	$p = 95 \%$	$p = 99 \%$	$p = 100 \%$
normálne	1,960	2,576	3 ($p=99,73 \%$)
rovnorné (obdĺžnikové)	1,65	1,71	1,73 ($\sqrt{3}$)
lichobežníkové *	1,65 – 1,90	1,71 – 2,20	1,73 – 2,45
trojuholníkové	1,90	2,20	2,45

Konfidenčný interval

Konfidenčná úroveň, konfidenčný koeficient (confidence level, confidence coefficient) – je hodnota pravdepodobnosti ($1-\alpha$) spojená s konfidenčným intervalom alebo so štatistickým intervalom pokrytia. Často sa vyjadruje v percentách.

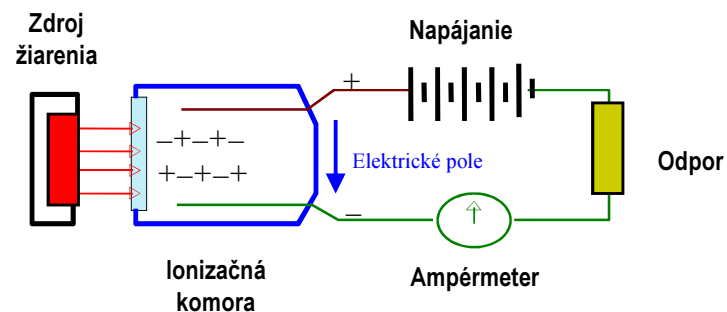
Štatistický interval pokrytia (statistical coverage interval) je interval o ktorom môžeme s danou konfidenčnou úrovňou tvrdiť, že obsahuje aspoň zadaný podiel základného súboru.

Jednostranný konfidenčný interval je definovaný hodnotou medzi T a minimálnou resp. maximálnou hodnotou odhadovaného parametra θ (interval (θ_{\min}, T) , resp. (T, θ_{\max})) tak, že konfidenčná úroveň ($1-\alpha$) predstavuje pravdepodobnosť $\Pr(T \geq \theta)$ resp. $\Pr(T \leq \theta)$.

Dvojstranný konfidenčný interval je definovaný medzami T_1 a T_2 tak, že pravdepodobnosť $\Pr(T_1 \leq \theta \leq T_2)$ je väčšia alebo rovná ($1-\alpha$)

Princípy využitia ionizácie na detekciu žiarenia (plynom plnené detektory)

Ionizujúce žiarenie priamo alebo nepriamo ionizuje plynné prostredie detektora



Počet iónových párov N v jednotke objemu (ip/cm³)

Priemerný počet iónových párov, ktoré sa vytvoria po odovzdaní energie E od primárnej častice vrátane párov vytvorených sekundárnymi elektrónmi v plyne jednotkového objemu závisí od energie potrebnej na vytvorenie jedného iónového páru. Stredná energia potrebná na vytvorenie IP je w .

$$N = \frac{E}{V \cdot w}$$

E – energia častice vstupujúcej do detektora
 w – stredná energia ionizácie plynu

Pre viac častíc:

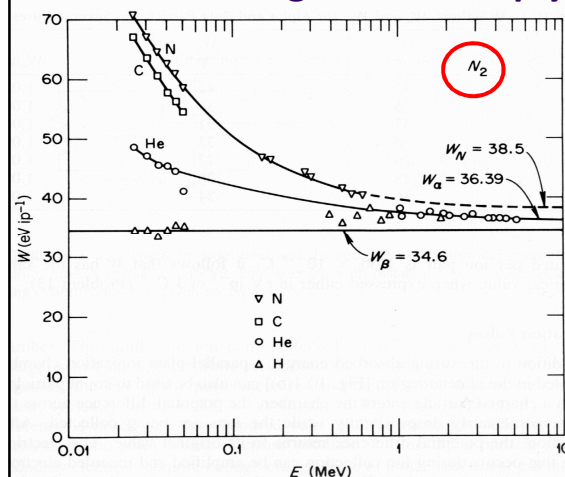
Prikon fluencie = hustota toku častíc (cm⁻²·s⁻¹)

Prikon fluencie energie monoenergetických častíc s energiou E

$$N = \frac{\dot{\Phi} \cdot E}{V \cdot w} = \frac{\dot{\Psi}}{V \cdot w}$$

V tomto prípade uvažujeme veľký detektor, v ktorom sa častica úplne pohltí.

Stredná energia ionizácie plynu w (eV/ip)



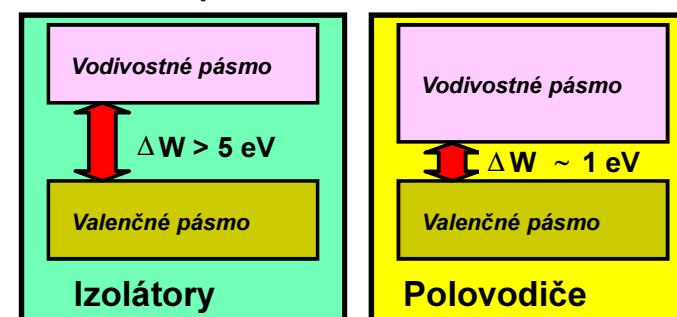
Hodnoty w v dusíku pre beta častice (elektróny aj protóny), alfa častice (jadrá He), jadrá uhlíka a dusíka v závislosti na ich energii.

Pre ťažšie častice energia potrebná na vytvorenie jedného IP je pri vysokých energiách približne konštantná (t.j. **energia častice môže byť odvodená od počtu vytvorených IP**) ale pri nízkych energiách narastá, pretože narastá podiel energie stratenej na **excitáciu na úkor ionizácie**.

Stredná energia ionizácie plynu w (eV/ip)

Plyn	Alfa žiarenie	Beta žiarenie	w_α/w_β
He	43	42	1,02
H ₂	36	36	1,00
O ₂	33	31	1,06
CO ₂	36	33	1,09
CH ₄	29	27	1,07
C ₂ H ₄	28	26	1,08
Vzduch	36	34	1,06

Ionizácia v izolátoroch a polovodičoch Šírka zakázaného pásma



Izolátorom je napríklad **plyn** argón, polovodičom je napríklad kremík ($\Delta W=1,12\text{eV}$). Stredná energia potrebná na vytvorenie jedného iónového páru je pre polovodič **kremík 3.6 eV a pre argón 15 eV**.

Iónová bilancia v jednotke objemu ionizačnej komory

$$\frac{dn}{dt} = N - \alpha n^2 - \frac{i}{V \cdot e}$$

zmena koncentrácie $\text{ip.s}^{-1}.\text{cm}^{-3}$ = vznik – rekombinácia – zozbierané na elektródach

N - počet iónov, ktoré vznikajú v jednotke objemu za jednotku času
 n - počet iónov, ktoré sa už v jednotkovom objeme nachádzajú
 α - koeficient rekombinácie
 i - ionizačný prúd prechádzajúci obvodom
 e - náboj iónu
 V - objem ionizačnej komory
 αn^2 - počet iónov, ktoré zanikli rekombináciou v jednotke objemu
 i/Ve - počet iónov pozbieraných elektródami

Iónová bilancia v stacionárnom stave

$$\frac{dn}{dt} = 0$$

$$\frac{dn}{dt} = N - \alpha n^2 - \frac{i}{V \cdot e}$$

Ak elektrické pole nie je pripojené, $i = 0$ a teda $N = \alpha n^2$.

Z toho dostaneme maximálny počet existujúcich iónových párov n_{\max} .

$$n_{\max} = \sqrt{\frac{N}{\alpha}}$$

Iónová bilancia v stacionárnom stave

$$\frac{dn}{dt} = 0$$

$$\frac{dn}{dt} = N - \alpha n^2 - \frac{i}{V \cdot e}$$

- Keď ionizačný prúd dosiahne hodnotu nasýtenia, $i = i_{\text{nas}}$, rekombinácia bude nulová $\alpha n^2 = 0$ a prúd z detektora bude i .

$$i = i_{\text{nas}} = V \cdot e \cdot N$$

- Energia absorbovaná v celom objeme detektora bude rovná $E_{\text{abs}} = \Phi \cdot E = i \cdot w / e$

$$i = \frac{e \cdot \dot{\Phi} \cdot E}{w}$$

- **Prúd nasýtenia je priamo úmerný energii absorbovanej v plyne.**

$$E_{\text{abs}} = \frac{i \cdot w}{e}$$

Minimálny detekovateľný príkon fluencie energie

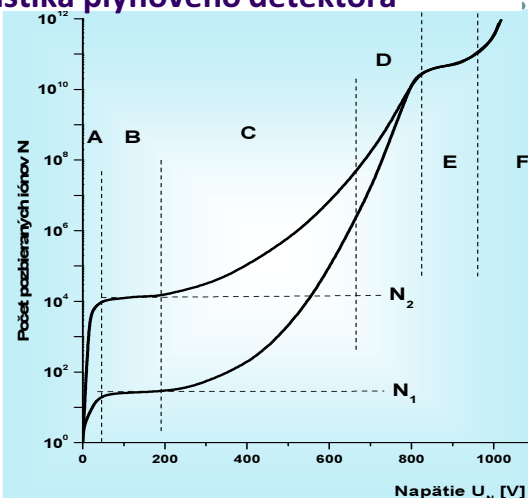
- Dobrý ampérmeter je schopný odmerať prúdy na úrovni 10^{-16} A.
- To zodpovedá energii absorbovanej v plyne detektora $E = iw/e$
- Nech máme plyn so strednou energiou ionizácie $w = 30$ eV.
- Vieme, že elementárny náboj je $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C.
- Vieme, že $IA = IC \cdot s^{-1}$

$$E_{\text{abs}} = \frac{i \cdot w}{e} = \frac{(10^{-16} \text{ C} \cdot \text{s}^{-1}) \times 30 \text{ eV}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 1,88 \times 10^{-4} \text{ eV} \cdot \text{s}^{-1}$$

Taký prúd môže byť vytvorený napr. jednou beta časticou o energii 18,8 keV za sekundu, ktoré za zabrzdia v objeme detektora.

Voltampérová charakteristika plynového detektora

- A. oblasť Ohmovho zákona, nevyužíva sa na detekciu IŽ
- B. oblasť nasýteného prúdu, ionizačné komory
- C. proporcionálna oblasť, plynové zosilnenie, proporcionálne detektory
- D. oblasť čiastočnej proportionality, nevyužíva sa na detekciu
- E. Geiger - Müllerova oblasť
- F. oblasť samovoľného výboja korónové a iskrové detektory



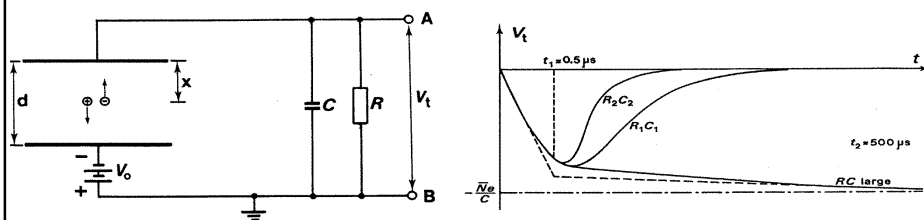
Ionizačná komora

- Ak sa určitý objem plynu v konštantnom radiačnom poli uzavrie v nádobe obsahujúcej dve elektródy, medzi ktorými sa udržiava rozdiel elektrického potenciálu, potom sa kladné ióny budú pohybovať smerom ku katóde a elektróny smerom k anóde a elektrický prúd, tzv. ionizačný prúd, potečie v plyne a vo vonkajšom okruhu.
- Takéto zariadenie sa nazýva ionizačná komora a hodnota ionizačného prúdu, pozorovaného vo vonkajšom okruhu, je mierou počtu plynových iónových párov vytvorených vo vnútri ionizačnej komory a teda aj množstva príslušného žiarenia, ktoré cez ňu prechádza.
- Usporiadanie komory je najčastejšie buď cylindrické, pozostávajúce z valcovej vonkajšej a vnútornej axiálnej elektródy, alebo pravouhlé, pozostávajúce z paralelných dosiek, alebo mriežok.

Impulzný ionizačný režim

Ak sa ionizačná komora opatrí vonkajším obvodom RC, potom pohyb elektrónov smerom k anóde a kladných iónov smerom ku katóde bude indukovať impulz napätia V_t na vysokoohmovom odpore R , pričom V_t je funkciou času t .

Pohyblivosť elektrónov sú asi 10^3 krát väčšie, ako pohyblivosť kladných iónov, takže počiatočný ostrý záporný sklon je spôsobený pohybom elektrónov smerom od katódy a pomalý návrat chvostu impulzu je spôsobený indukčným účinkom kladných iónov smerom ku katóde.



Plynové zosilnenie - proporcionálne čítače

Ak sa po dosiahnutí saturácie napätie priložené na ionizačnú komoru ďalej zvyšuje, dosiahne sa stav, kedy elektróny urýchlené smerom k anóde dosiahnu medzi zrážkami s neutrálnymi molekulami rýchlosti a teda aj energie dostatočné na ionizáciu týchto molekúl a na tvorbu väčšieho počtu iónových párov, čím nastáva násobenie iónových párov, prevyšujúce počet tie, ktoré sa vytvárajú dopadajúcim žiarením.

Nástup takéhoto násobenia nastáva pri valcovej ionizačnej komore pri menšom napätí, než pri ionizačnej komore s paralelnými doskami, obsahujúcej porovnateľnú hmotnosť daného plynu, pretože v blízkosti tyčovej, alebo drôtenej anódy s relatívne malým polomerom je oveľa vyššia intenzita elektrického poľa.

V dôsledku tohto násobenia iónových párov sa prúd tečúci vo vonkajšom okruhu pri zvyšovaní napätia ďalej zväčšuje.

GM detektory

V proporcionálnej oblasti sa reťazový násobiaci proces, pri ktorom jeden elektrón môže vyprodukovať veľký počet iónových párov, nazýva **Townsendova lavína**.

Primárna ionizačná udalosť normálne vytvorí stlačený tvar takýchto lavín, ktorých veľkosť a dĺžka pozdĺž anódového drôtu bude daná veľkosťou a sklonom primárnej udalosti.

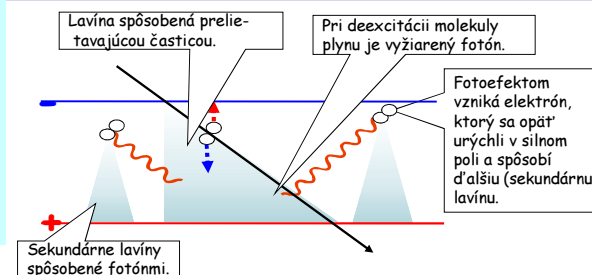
Keď je priložené napätie tak veľké, že elektrónovo-iónová pošta obalí celú dĺžku anódy, hovoríme, že ionizačná komora pracuje v Geigerovej oblasti.

Pri prevádzke v Geigerovej oblasti pri danom priloženom napätí je amplitúda všetkých výstupných impulzov z plynovej ionizačnej komory v rámci štatistických hraníc rovnaká, nezávislá na počte elektrón-iónových párov v primárnej ionizačnej udalosti.

Geiger-Müllerova trubica

Geiger-Müllerov počítač funguje pri tak vysokom napätí, že jediný pár spôsobí výboj v plyne. Dostávame veľký signál, ktorý nezávisí na energii a druhu dopadajúcej častice.

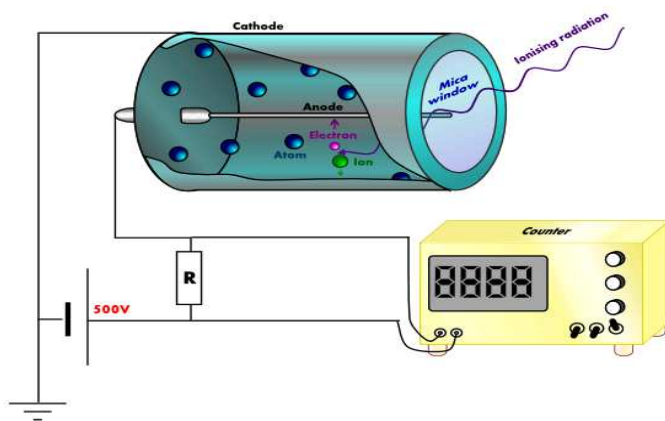
Namiesto jednej lavíny vzniká veľa lavín pozdĺž celej dĺžky anódy. Tieto sekundárne lavíny sú spôsobené fotónmi, ktoré sú emitované pri deexcitácii molekúl. Fotóny prelietajú detektorom a spôsobujú ďalšiu ionizáciu.



Náplňou detektora sú vzácne plyny (argón), do ktorých sa pridáva prímes (napr. etylén), ktorý pohlcuje fotóny vznikajúce pri deexcitácii a tým preruší („zahasí“) výboj.

Geiger-Müllerov počítač

so sľudovým okienkom



Náplň detektorov s plynovým zosilnením

Plynové zosilnenie závisí od mobility elektrónov. Preto nie je žiaduce, aby sa v náplni elektróny zachytávali a vytvárali negatívne ióny na tzv. elektronegativných nečistotách. Takéto vlastnosti má napr. kyslík. Obsah 0,1% O_2 v plyne zníži o 10% množstvo elektrónov na trase 1 cm.

Nie len ionizácia ale aj excitácia molekúl plynu môže prispieť k signálu nepriamo, potom ako sa deexcitáciou vyžiari fotón UV, ktorý môže spôsobiť fotoelektrickú interakciu so slabšie viazaným elektrónom v plynovej náplni alebo v stene detektora. Takéto procesy sú žiaduce v GM detektoroch, lebo zosilňujú signál, ale v proporcionálnych detektoroch sú nežiaduce, lebo skresľujú proporionalitu. Na pohltienie takých fotónov a zabránenie následných výbojov sa do monoatómového plynu pridáva polyatómový plyn napr. do Ar sa pridáva CH_4 .

Náplň detektorov s plynovým zosilnením

- Ar+5% metan (P-5) resp. Ar+10% metan (P-10) - dobré plynové zosilnenie a dobrá cena
- detekcia tepelných neutrónov - BF_3 , ^3He
- spektroskopia rýchlych neutrónov - H_2 , metán, ^3He
- dozimetrické merania s tkanivu-ekvivalentným zložením plynovej náplne: 64,4% metán + 32,4% CO_2 + 3,2% N_2
- napriek elektronegativite kyslíka je aj vzduch vhodný plyn

Vlastnosti GM detektorov

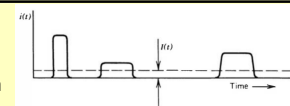
- sú lacné a nevyžadujú zložitú elektroniku
- fungujú v impulznom režime
- jeden impulz je tvorený 10^9 - 10^{10} IP a predstavujú amplitúdu niekoľko voltov. Takéto vysoké množstvo IP je potrebné na to aby pomalé kladné ióny, ktoré sú vytvorené najmä okolo kladnej anódy z drôtika zníži pôvodnú intenzitu elektrického poľa a prerušili lavínový výboj. (Kladné ióny akoby zväčšili polomer anódy).
- plynová náplň, ktorá sa neobnovuje môže vyhárať a preto majú také GM obmedzenú životnosť.
- na zhášanie sekundárnych výbojov sa pridáva polyatómový plyn napr. etylalkohol (mä životnosť cca. 10^9 impulzov).
- Halogénové GM trubice s obsahom Cl_2 alebo Br_2 nevyhárajú ale výsledkom zhášacej funkcie je disociácia molekuly, ktorá sa po čase zasa spontánne spojí. Životnosť je preto neobmedzená.

Pracovný režim detektorov - Impulzný režim

- Meracia aparátúra registruje každú interakciu v detektore.
- Bez ohľadu na vytvorený náboj v detektore Q , bude zaregistrovaný každý impulz s amplitúdou presahujúcou low level threshold – LLD.

Pracovný režim detektorov

Prúdový režim - priemerný prúd je proporcionálny na rýchlosti r (s^{-1}) a vzniknutému náboju pri registrácii Q (C), ktorá závisí od absorbovanej energie E (MeV) a W (MeV) je energia potrebná na vytvorenie jedného IP s elementárnym nábojom $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.



$$I(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t i(t') dt'$$

$$\bar{I} = rQ = r \frac{E}{W} q$$

Pracovný režim detektorov

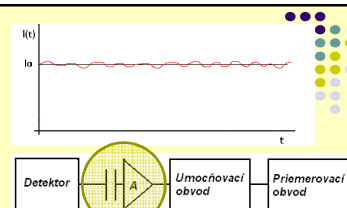
Prúdový režim - priemerný prúd je proporcionálny na rýchlosti r (s^{-1}) a vzniknutému náboju pri registrácii Q (C), ktorá závisí od absorbovanej energie E (MeV) a W (MeV) je energia potrebná na vytvorenie jedného IP s elementárnym nábojom $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

Campbellov alebo Mean Square Voltage MSV režim je založený na teóreme, že relatívna stredná kvadratická odchýlka registrovaného prúdu od prekrývajúcich sa impulzov je rovnaká ako relatívna stredná kvadratická odchýlka počtu zaregistrovaných impulzov:

$$\frac{\sigma_I(t)}{I_0} = \frac{\sigma_n}{n} = \frac{\sqrt{rT}}{rt} = \frac{1}{\sqrt{rT}}$$

$$\sigma_I^2(t) = \left(I_0 \cdot \frac{\sigma_n}{n} \right)^2 = \frac{(rQ)^2}{rT} = \frac{rQ^2}{T}$$

$$\sigma_n = \sqrt{n} = \sqrt{rT}$$



Filter prepustí iba striedavú zložku prúdu, ktorá predstavuje odchýlku

$$I = rQ = r \frac{E}{W} q$$

Príklady použitia GM detektorov



Osobné dozimetre

GM trubica ako monitor prostredia



- Detekované žiarenie: gama a X, energetická odozva zodpovedá priestorovému dávkovému ekvivalentu $H^*(10)$
- Energetický rozsah: 50 keV až 3 MeV pre rozsah dávkového príkonu 0,01 $\mu\text{Sv/h}$ až 10 mSv/h a 80 keV až 3 MeV pre rozsah dávkového príkonu 10 mSv/h až 10 Sv/h
- Typ detektora: 2 halogenové samozhášacie energeticky kompenzované GM trubice

Plynové detektory neutrónov na báze He-3



- (1) The counter length can be agreed with the customer.
- (2) PC-proportional counter mode (with gas amplification)
- (3) IIC-Impulse ionization chamber mode (without gas amplification)
- (4) He-3 pressure in the counter CN-04 can be increased up to 6 atm, if ordered specifically
- (4) In case of isotropic flow of thermal neutrons, registration efficiency increases if He-3 pressure is increased, too.

Counter type	CN-01	CN-03	CN-04
Diameter	30 mm	18 mm	30 mm
Length of the operating part (1)	900 mm	100 mm	970 mm
Operation mode (2)	IIC	PC	PC, IIC
He-3 pressure	2 atm	7 atm	2 atm (3)
Own background, not more	0.01 imp/s	0.001 imp/s	0.001 imp/s
Insulation resistance, not less	1011 Ohm	1011 Ohm	1011 Ohm
Operating voltage	400 V	1200 V	400-1200 V
Efficiency of registration of thermal neutrons(4), not less	50%	70%	60%
Charge collection time	4 mcs	2 mcs	2 mcs
Length of working plateau	—	200 V	200 V
Plateau tilt for 100V	—	1%	1%
Operating temperature range	$\pm 50^\circ\text{C}$	$\pm 50^\circ\text{C}$	$\pm 50^\circ\text{C}$
Weight, not more than	0.6 kg	0.2 kg	0.5 kg

FHT 65 L/LX Monitor kontaminácie rúk a nôh

- **FHT 65 L:**
- prietokový plynový proporcionálny detektor
Ar+CH₄, Ar+CO₂ or CH₄ for alpha/beta
monitoring
- **FHT 65 LX:**
- Uzavretý **xenónový detektor na gama**
monitoring

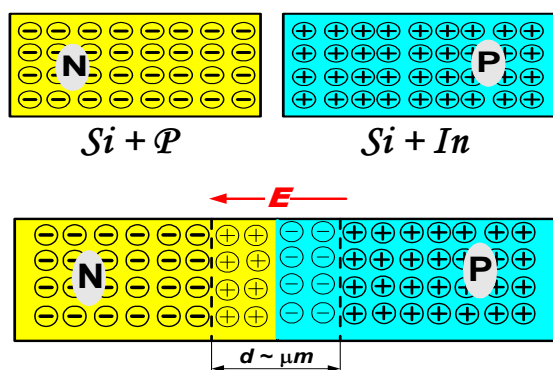


FHT 111 M Contamat[®]

- Meranie povrchovej kontaminácie alfa, beta a gama rádionuklidmi.
- Používa veľkoplošný proporcionálny plynový detektor a mikroprocesor na výpočty.
- Výsledok merania v cps, Bq or Bq/cm²
- Súčasné meranie alfa a beta
- 10 referenčných izotopov v pamäti
- alarmy
- vyhľadávací režim so zvukom
- možnosť odrátania pozadia
- pamäť pre 128 nameraných údajov



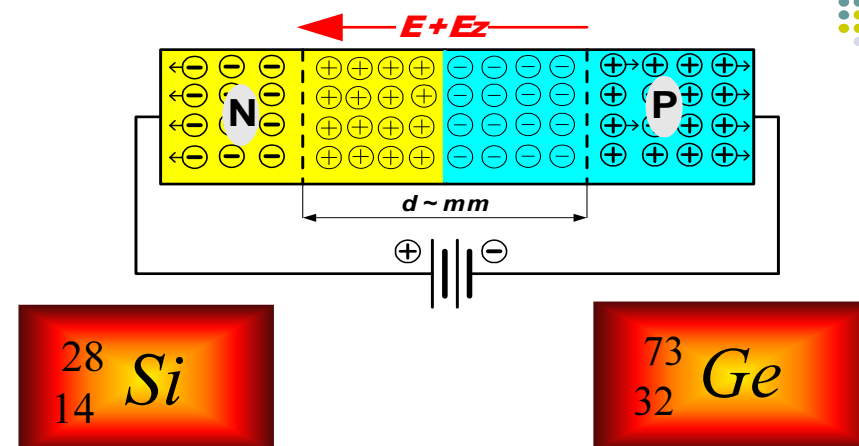
Polovodičové detektory Vytvorenie ochudobnenej vrstvy



Pri spojení polovodiča typu p a n vznikne v okolí rozhrania **oblasť priestorového náboja** nazývaná tiež P-N prechod.

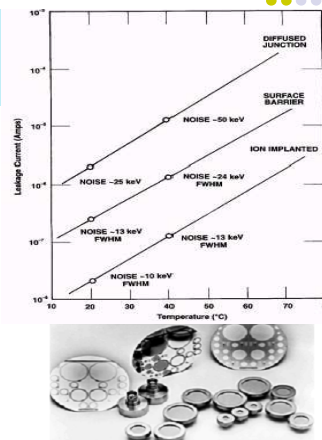
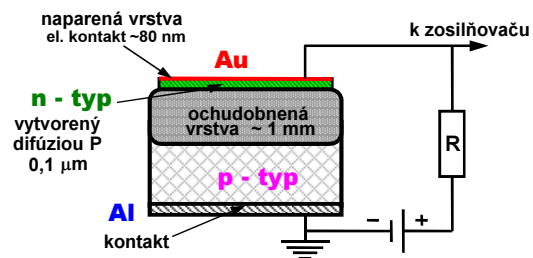
Oblasť kladného náboja je tvorená ionizovanými donormi v polovodičoch typu n a oblasť záporného náboja je tvorená ionizovanými akceptormi v polovodičoch typu p.

Vytvorenie ochudobnenej vrstvy

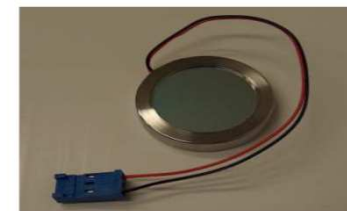


Polovodičové kremíkové detektory

1. **DJ** - detektory s difúznou vrstvou (Diffused Junction)
2. **SBD** - detektory s povrchovou bariérou (Surface Barrier Detector)
3. **PIPS** - pasivované detektory s ióno-implantovaným kontaktom (Passivated Implanted Planar Silicon)



Single area totally depleted ion implanted

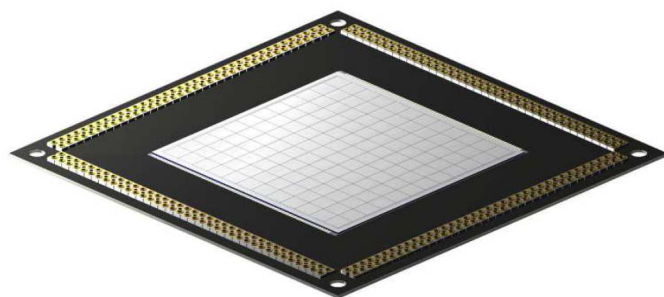


MSD024 detector supplied as an alpha monitor.

RADIATION HARDNESS:
CAPACITANCE:
LEAKAGE CURRENT:
OPERATING TEMPERATURE
RANGE:
ENVIRONMENTAL TESTING
OPTIONS:

Survival to 10^{14} Neutrons, 10^{15} Protons
Subject to depletion depth e.g. 40 pF/cm for 300 μ m
1 nA/cm to 8 nA/cm subject to active area and depletion depth.
-65°C to +125°C
Space qualified, military, industrial, research, physics projects.

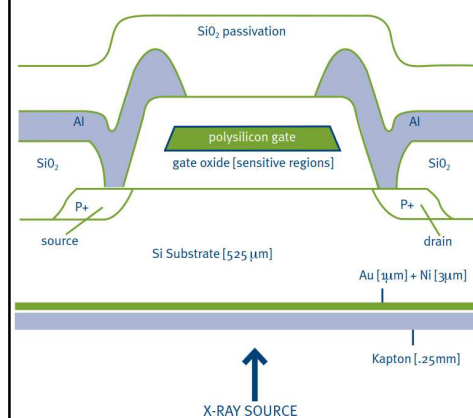
Silicon position sensitive pixel detector



MSPX 12x12 with double metal tracking mounted on a double stack transmission PCB.

MOSFET dozimetre.

Príklad detektora s p+ kanálom v polovodiči typu n pre nízkoenergetické fotónové žiarenie.



Na obrázku je štruktúrna schéma MOSFET detektora vytvoreného na kremíkovom substráte typu n s kanálom P+ s polysilikónovým oxidickým hradlom (gate oxid).

Po priložení dostatočne vysokého napätia V_{TH} (threshold voltage) medzi source a drain prechádza prúd I_{DS} , ktorý závisí od množstva nosičov náboja vytvorených Si substráte.

Použitie ako integrálny dozimeter:

Pri ožarovaní ionizujúcim žiarením vznikajú nosiče náboja v oblasti polysilicon gate, pričom dierové nosiče, kvôli nízkej pohyblivosti zostávajú zachytené v pascách oxidickej štruktúry. Koncentrácia zachytených dierových nosičov náboja je úmerná dávke ožiarovania kým nastane nasýtenie. Zachytené dierové nosiče pri vyhodnocovaní dozimetrom spôsobujú zmenu ΔV_{TH} , ktorej zmeranie je základom vyhodnotenia dávky.

Pravdepodobnosť prechodu elektrónov z valenčného do vodivostného pásma vplyvom tepelných excitácií.

$$p(T) = \text{const} \cdot T^{3/2} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right)$$

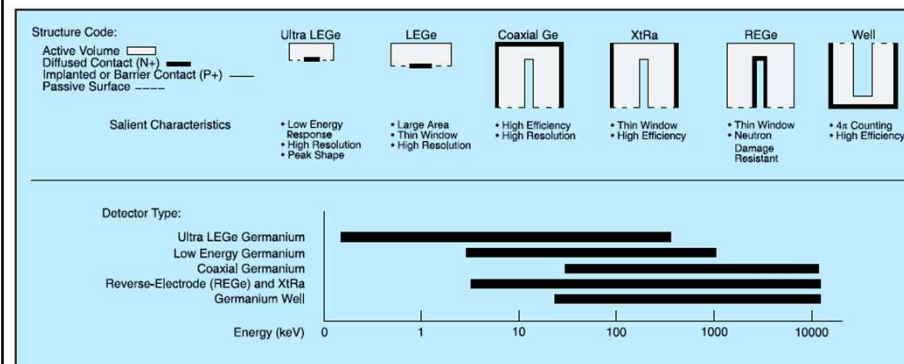
Šírka zakázaného pásma ΔW

- pri T=300 K: $\Delta W_{\text{Si}} = 1,115 \text{ eV}$ $\Delta W_{\text{Ge}} = 0,665 \text{ eV}$
- pri T= 0 K: $\Delta W_{\text{Si}} = 1,165 \text{ eV}$ $\Delta W_{\text{Ge}} = 0,746 \text{ eV}$
- Nosiče náboja, ktoré sa vytvárajú v pracovnom objeme polovodiča vplyvom tepelných excitácií spôsobujú v detekčnom obvode šumový prúd.
- Šumový prúd by nemal presahovať $10^{-10} - 10^{-8} \text{ A}$, aby sme mohli registrovať prúd vznikajúci ionizujúcim žiarením.
- Túto podmienku spĺňa:

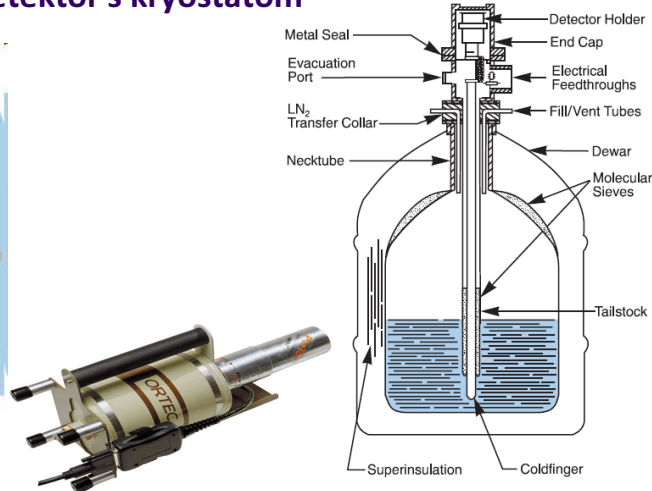
$p_{\text{Si}}(T) \ll p_{\text{Ge}}(T)$

 - kremík už pri izbovej teplote,
 - germánium sa musí chladiť na teplotu kvapalného dusíka (T = 77 K).

Rôzne typy Ge detektorov a ich vlastnosti



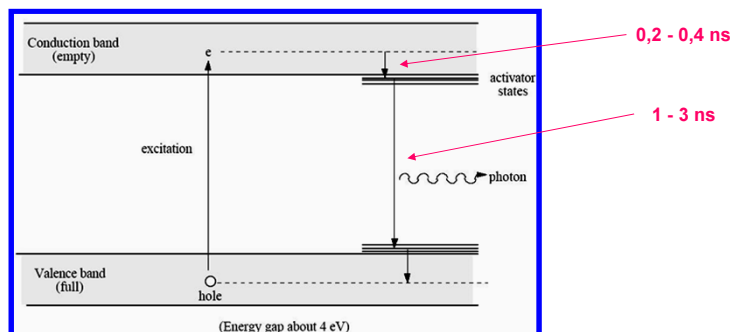
Polovodičový detektor s kryostatom



Luminiscencia

- Luminiscencia** predstavuje emisiu svetla niektorými látkami - luminofórmami. Luminofóry môžu absorbovať energiu, časť tejto energie si uchovať a premeniť ju na svetelné žiarenie.
- Scintilácia** - okamžitá, nestimulovaná, rýchla luminiscencia, vyvolaná dopadom ionizujúceho žiarenia
- Termoluminiscencia** - oneskorená luminiscencia stimulovaná teplom
- Rádiotermoluminiscencia** - termoluminiscencia, ktorá vzniká len po predchádzajúcom ožiarení ionizujúcim žiarením
- Fotoluminiscencia** - luminiscencia stimulovaná svetlom
- Fluorescencia** - fotoluminiscencia, ktorá trvá len dovtedy kým trvá osvetlenie
- Fosforescencia** - fotoluminiscencia, ktorá trvá aj po prerušení osvetlenia

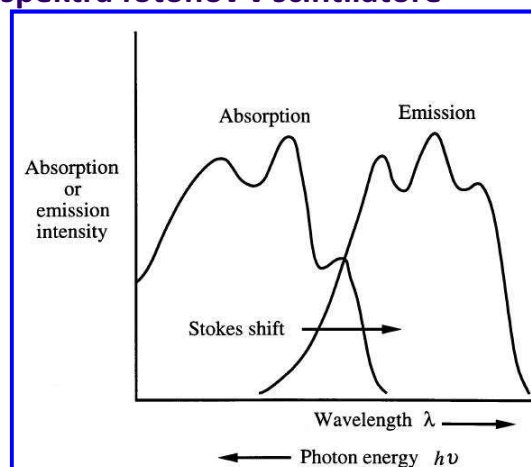
Vznik scintilácií



Inorganické scintilátory, ako napr. NaI(Tl) generujú svetelné záblesky pri deexcitácii na energetických hladinách aktivátora.

Organické scintilátory, ako napr. polystyrén $(C_6H_5O_2)_n$ zasa pri deexcitácii z molekulových hladín (UV záblesky).

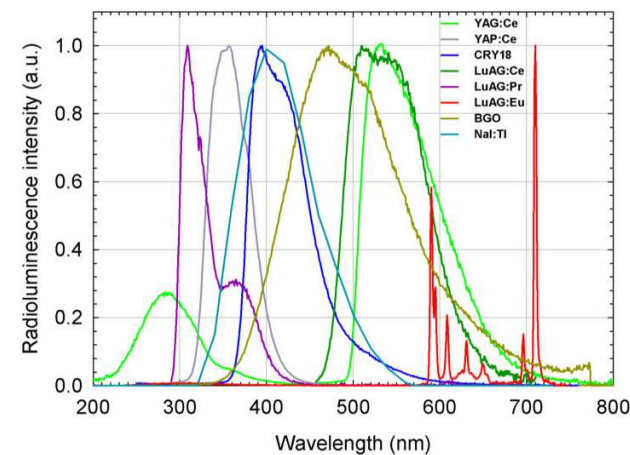
Posun spektra fotónov v scintilátore



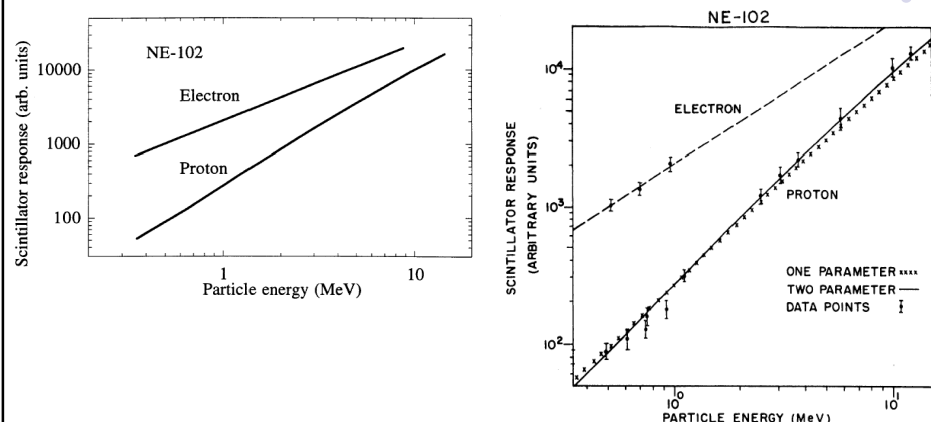
Požiadavky na scintilátory

- Vysoká **luminiscenčná účinnosť** - pomer absorbovanej a emitovanej energie. Relatívna luminiscenčná účinnosť udáva pomer k štandardu, ktorým je NaI(Tl) pre gama žiarenie a antracén pre beta.
- Maximum intenzity vyžarovaného svetla (λ_{max}) musí ležať v oblasti maximálnej citlivosti použitého fotonásobiča.
- Scintilátor musí byť čo **najprehľadnejší** pre vyžarované svetlo.
- **Dosvit** scintilátora má byť čo najkratší, aby mal detektor vysokú rozlišovaciu schopnosť.
- **Hustota** scintilátora by mala byť čo najväčšia, aby mali väčšiu schopnosť absorbovať gama žiarenie.
- Intenzita vyžarovaného svetla má byť **úmerná** energii žiarenia (mernej ionizácii). To umožňuje použiť scintilátory na spektrometriu.

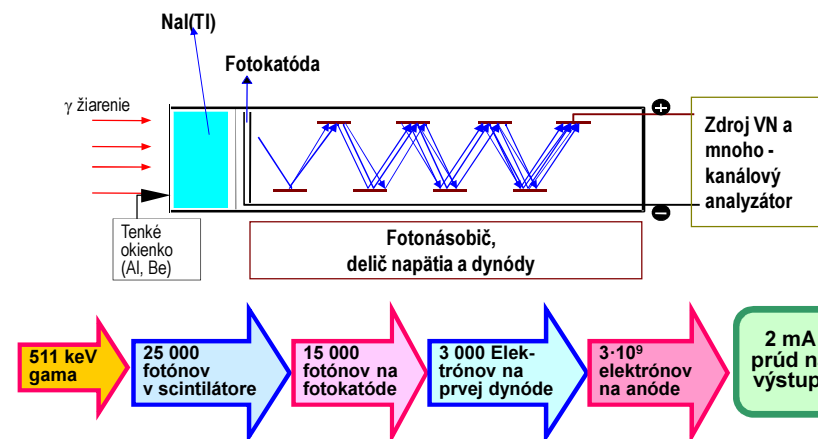
Emisné spektrum scintilátorov



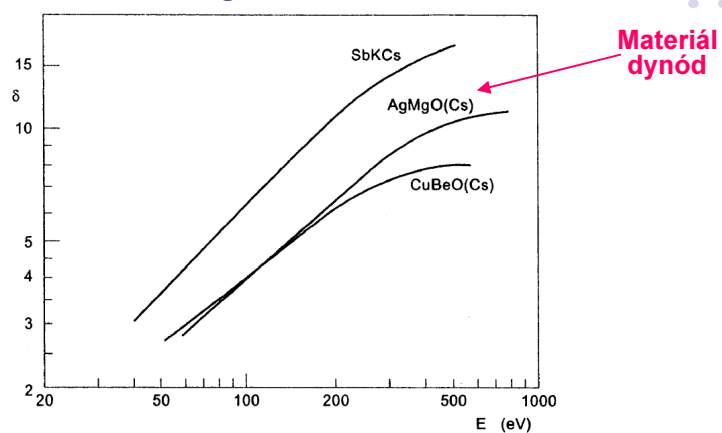
Intenzita vyžarovaného svetla je úmerná energii žiarenia (mernej ionizácii)



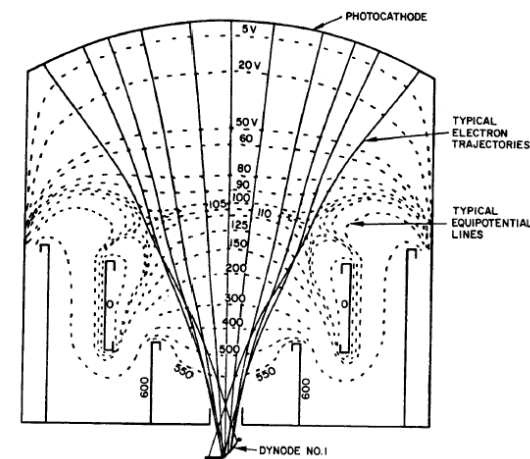
Principiálna schéma scintilačného detektora



Výťažok elektrónov na dynódach v závislosti od ich energie



Usmernenie elektrónov z fotokatódy na prvú dynódu



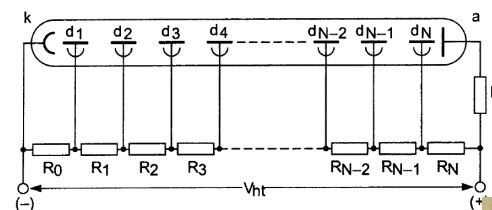
Materiál fotokatódy

QE - Quantum Efficiency

Cathode type	Composition	Peak QE	Peak λ
S1	AgOCs	0.4%	800 nm
S10	BiAgOCs	7%	420 nm
S11	CS ₃ SbO	21%	390 nm
S20 (multi-alkali)	Na ₂ KSbCs	22%	380 nm
Bialkali	K ₂ CsSb	27%	380 nm
Bialkali (high temp)	Na ₂ KSb	21%	360 nm
Bialkali (high temp)	KCsRbSb	24%	440 nm
Bialkali	RbCsSb	25%	450 nm
Solar blind	CeTe	18%	200 nm
Solar blind	CsI	15%	135 nm

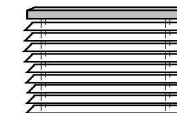
Delič napätia fotonásobiča

Fotonásobič typu benátska roleta



Spravidla dosahuje pripojené VN 1-2 kV, pričom je rozdelené na 8-14 dynód s potenciálovým rozdielom 100 - 150 V.

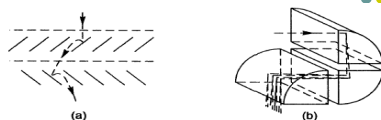
Aby sa lepšie zozbieral náboj na prvej dynóde, je tam potenciálový rozdiel väčší ($R_0 = 3 \cdot R_1$)



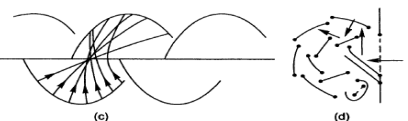
Rôzne usporiadanie dynód

a) Venetian blind – benátska roleta

Allows simple input system with high collection efficiency. Good gain stability, but mediocre timing performance



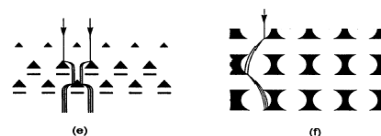
b) Box and Grid: characteristics similar to a)



c) Linear focusing – časovo fokusované: good timing characteristics



d) Circular cage – kruhová sieťka: compact



e) Mesh dynodes – sieť dynód:

low gain, but usable up to $B=1T$



f) Foil dynodes – dierkovaná fólia:

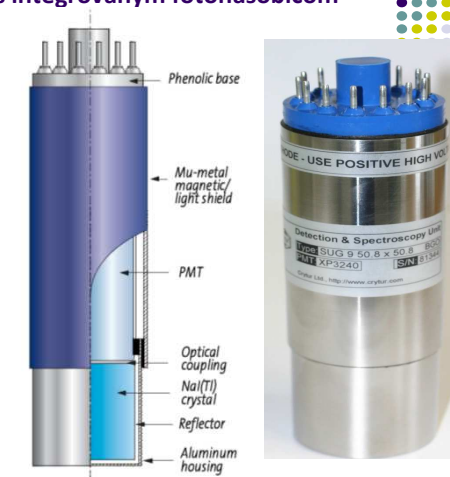
perforated metal foils – particularly useful for multi-channel anodes



Napájacia päťica a scintilačný detektor s integrovaným fotonásobičom



Scintilačný kryštál, napr. NaI(Tl) je umiestnený v hermetickom púzde z ľahkého kovu (Al) natretom z vnútra svetelným reflektorom. Optickým spojom je pripojený k okienku **fotonásobiča (PMT – photomultiplier tube)**, ktorý je vo svetlotesnom magneticly odtienenom púzde. Detekčná časť je ukončená bazovými kontaktami uchytenými v izolátore (fenoplast). **Napájacia päťica** obsahuje deličku vysokého napätia pre fotonásobič, predzosilňovač impulzov a v moderných prístrojoch aj mnohokanálový analyzátor impulzov.



Parametre moderných scintilátorov

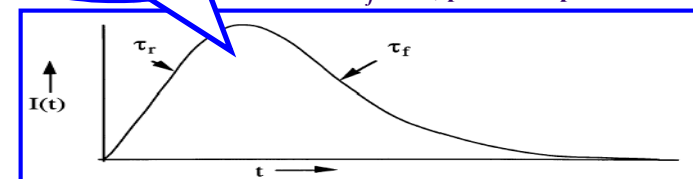
Physical properties	NaI:TI	YAG:Ce	LuAG:Ce	YAP:Ce	BGO	CaF:Eu	CsI:TI
Density [g/cm ³]	3.67	4.57	6.73	5.37	7.13	3.18	4.51
Hardness [Mho]	28.5	8.5	8.6	-	4	2	5.8
Index of refraction	1.85	1.82	1.84	1.95	2.15	1.44	1.78
Crystal structure	Cubic	Cubic	Cubic	Rhombic	Cubic	Cubic	Cubic
Melting point [°C]	651	1970	2020	1875	1050	1360	621
Hygroscopic	Yes	No	No	No	No	No	Slightly
Linear coef. thermal expansion [10 ⁻⁵ /K]	4.75	0.8-0.9	-	0.4-1.1	0.7	1.95	5
Chemical formula	NaI	Y ₃ Al ₅ O ₁₂	Lu ₃ Al ₅ O ₁₂	YAlO ₃	Bi ₄ (GeO ₃) ₃	CaF ₂	CsI
Luminescence properties							
Integrated light output [% NaI:TI]	100	40	20	70	15-20	50	45
Wavelength of max. emission [nm]	415	550	535	370	480	435	550
Decay constant [ns]	230	70	70	25	300	940	900
Afterglow [% at 6 ms]	0.5-5	<0.005	-	<0.005	<0.005	<0.3	<2
Radiation length [cm] for 511 keV	2.9	3.5	-	2.7	1.1	3.05	1.86
Photon yield at 300 K [103 Ph/MeV]	38	35	20	25	8-10	23	52

Rozlišovacia schopnosť scintilátora závisí od dosvitu

Časový priebeh svetelného záblesku v scintilátore s časovými konštantami τ_r a τ_f

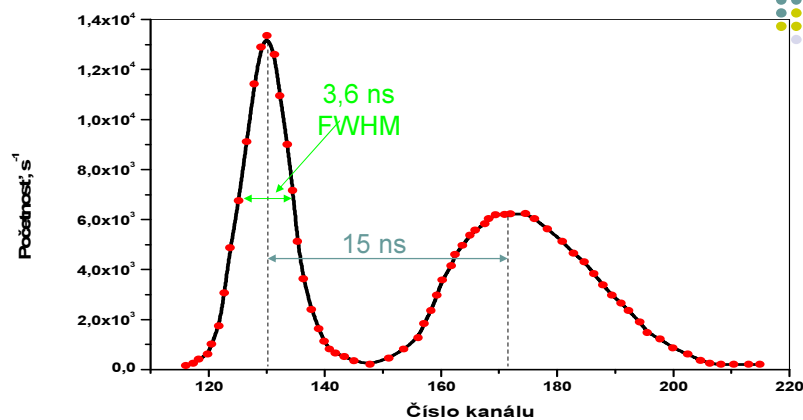
$$I(t) = I_0 \left(e^{-t/\tau_f} - e^{-t/\tau_r} \right)$$

τ_r - rise, vzostup
 τ_f - fall, pokles resp. dosvit



τ_f - dosvit charakterizuje čas, za ktorý klesne intenzita svetelného záblesku e - krát, má byť čo najkratší!

Dosvit po ožiarení neutrónmi a gama žiarením



Prehľad anorganických (kryštalických) scintilačných materiálov

Materiál	λ_{\max} (nm)	τ_r (ns)	ρ (g/cm ³)	Fotónov na 1 MeV
NaI(Tl) (20°C)	415	230	3.67	38 000
pure NaI (-196°C)	303	60	3.67	76 000
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (20°C)	480	300	7.13	8 200
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (-100°C)	480	2000	7.13	24 000
CsI(Na)	420	630	4.51	39 000
CsI(Tl)	540	800	4.51	60 000
CsI(pure)	315	16	4.51	2 300
CsF	390	2	4.64	2 500
BaF ₂ (slow)	310	630	4.9	10 000
BaF ₂ (fast)	220	0.8	4.9	1 800
Gd ₂ SiO ₅ (Ce)	440	60	6.71	10 000
CdWO ₄	530	15000	7.9	7 000
CaWO ₄	430	6000	6.1	6 000
CeF ₃	340	27	6.16	4 400
PbWO ₄	460	2, 10, 38	8.2	500
Lu ₂ SiO ₅ (Ce)	420	40	7.4	30 000
YAlO ₃ (Ce)	390	31	5.35	19 700
Y ₂ SiO ₅ (Ce)	420	70	2.70	45 000

Mnohonásobná emisia

Vlastnosti organických scintilátorov

Material	State	λ_{\max} [nm]	τ_f [ns]	ρ [g/cm ³]	photons/MeV
Anthracene	crystal	447	30	1.25	$1.6 \cdot 10^4$
Pilot U	plastic	391	1.4	1.03	$1.0 \cdot 10^4$
NE104	plastic	406	1.8	1.03	$1.0 \cdot 10^4$
NE102	liquid	425	2.6	1.51	$1.2 \cdot 10^4$



Svetlovody - light guides

- A variety of raw materials are used depending on the scintillation material and application:

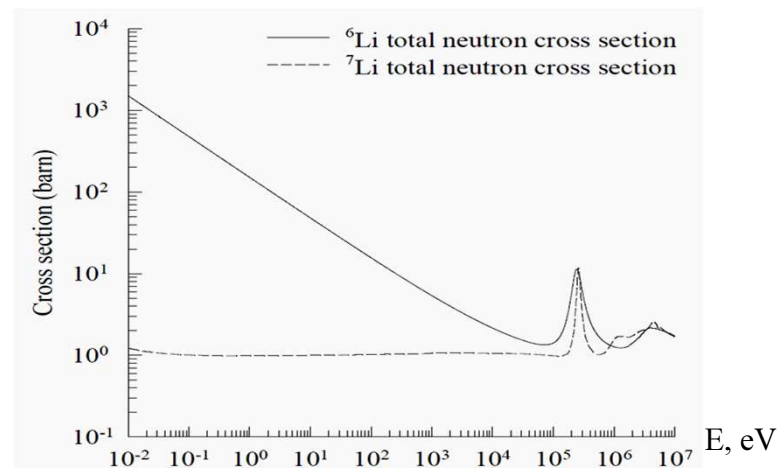
- organic glass (PMMA)
- special organic glass for near UV
- optical glass (BK7)
- quartz glass
- organic glass or quartz glass fibers
- fiber optic plate (FOP) or taper
- sapphire
- YAG(pure)



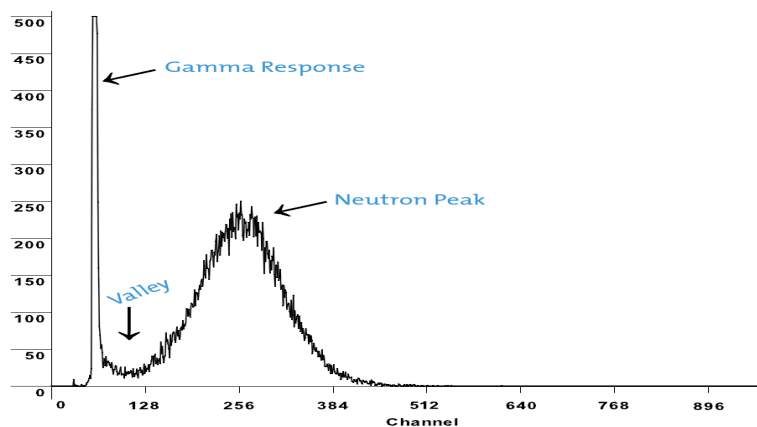
Scintilačný detektor neutrónov na báze ^6Li

- $^6\text{LiF} + \text{ZnS(Ag)}$ je homogénne zmiešané so spojivom a vylisované na 100 μm tenké fólie
- Využíva sa reakcia $^6\text{Li} + n = ^4\text{He} + ^3\text{H} + 4.8 \text{ MeV}$
- Produkty reakcie spôsobujú v ZnS záblesky, ktoré sa svetlovodom s vlnovým posunom vedú k fotonásobiču
- Impulzy od gama žiarenia sa oddeľujú diskriminátorom (PSD – Pulse Shape Discriminator)

Mikroskopický účinný prierez lítia



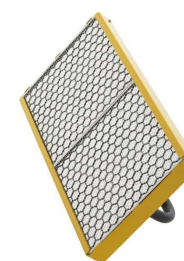
Scintilačný detektor neutrónov na báze ^6Li



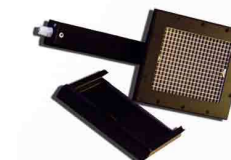
ALPHA-BETA SURFACE CONTAMINATION DETECTOR



Detector
 Measurement range of alpha radiation energy
 Measurement range of beta radiation energy
 Measurement range of alpha flux density
 Measurement range of beta flux density
 Measurement error
 Protection
 Working temperature
 Power supply

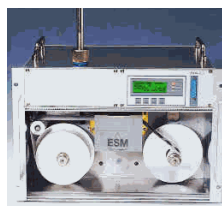


Plastic scintillator + ZnS
 3–10 MeV
 0.3–3 MeV
 1.5×10^3 p/min cm^2
 $2\text{--}5 \times 10^3$ p/min cm^2
 $\pm 20\%$
 IP54
 0 to + 50° C (or - 25 to + 50° C)
 9–18 V, 40 mA



FHT 59 C, FHT 59 Si... Monitor aerosólov

- Meranie **celkovej alfa a beta aktivity** aerosólov v plynných výpustiach jadrových zariadení. Detektor: scintilačný resp. polovodičový kremíkový (s povrchovou bariérou alebo PIPS).
- Celková aktivita** sa líši od **sumárnej aktivity** tým, že pri meraní sa používa spoločná účinnosť detekcie pre všetky detekovateľné rádionuklidy.
- Pre alfa aktivitu sa používa účinnosť pre amerícium ^{241}Am a pre beta aktivitu účinnosť pre ^{90}Sr .



Stacionárne meradlo skrytej rádioaktivity

- Použitie:
 - monitorovanie rádioaktivity v doprave (autá, vlaky, lode)
 - na hraničných prechodoch, na letiskách, v železnižných, šrotoviskách, jadrových zariadeniach.
- Modulárne usporiadanie umožňuje použitie 2 až 8 veľkoplošných plastických scintilačných detektorov 100 x 50 x 5 cm typ FHT 1388



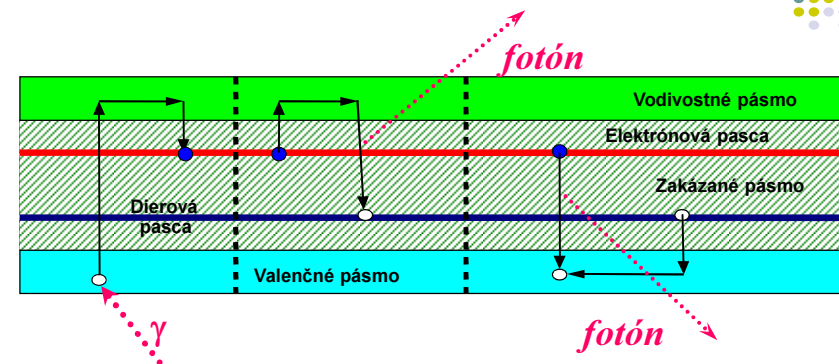
TLD dozimetre

- Luminiscencia** predstavuje emisiu svetla niektorými látkami - luminofórmami. Luminofóry môžu absorbovať energiu, časť tejto energie si uchovať a premeniť ju na svetelné žiarenie.

Využitie v dozimetrii:

- Scintilácia** - okamžitá, nestimulovaná, rýchla luminiscencia
- Termoluminiscencia** - oneskorená luminiscencia stimulovaná teplom
- Fotoluminiscencia - oneskorená luminiscencia stimulovaná svetlom (UV)

Podstata TLD



Charakteristiky materiálov TLD

Charakteristiky niektorých termoluminiscenčných materiálov

Typ TLD	Z _{ef}	Hlavný pík (°C)	Emisné maximum (nm)	Relatívna citlivosť	Fading (pri 25 °C)
LiF:Ti,Mg	8,3	200	400	1	5%/rok
LiF:Na,Mg	8,3	200	400	1	5%/rok
LiF:Mg,Cu,P	8,3	210	400	25	5%/rok
Li ₂ B ₄ O ₇ :Mn	7,3	220	605	0,2	4%/mesiac
Li ₂ B ₄ O ₇ :Cu	7,3	205	368	2	10%/2mesiace
Mg ₂ B ₄ O ₇ :Dy	8,4	190	490	10	4%/mesiac
BeO	7,1	190	200-400	0,2	8%/2mesiace
CaSO ₄ :Dy	14,5	220	480-570	30	1%/2mesiace
CaSO ₄ :Tm	14,5	220	452	30	1-2%/2mesiace
CaF ₂ :Mn	16,3	260	500	5	16%/2týždne
CaF ₂ (prír.)	16,3	260	380	23	veľmi malý
CaF ₂ :Dy	16,3	215	480-570	15	8%/2mesiace

Používanie TLD dozimetrov



TLD dozimetre SLM



1. **TLD typu BG2 je schopný monitorovať:**
 - fotónové žiarenie v energetickom rozsahu 20 keV – 10 MeV (t.j. aj X žiarenie)
 - beta žiarenie v energetickom rozsahu 170 keV – 2,7 MeV fotónového a beta žiarenia
2. **TLD typu NBG je schopný monitorovať** okrem fotónového a beta žiarenia vo vyššie uvedených rozsahoch aj tepelné neutróny (albedo dozimeter)
3. **Prstový aj náramkový TLD** je určený ako doplnkový dozimeter pre použitie na pracoviskách so zvýšeným rizikom ožiarovania prstov, resp. rúk, kde sa vyskytujú zdroje fotónového žiarenia energie 20 keV až 10 MeV. Výsledok merania odozvy dozimetra sa udáva ako **ekvivalentná dávka** v mieste umiestnenia TLD (na najexponovanejšom mieste končatín) v jednotkách Sievert. Bez bližšej špecifikácie ožarovacích podmienok možno prstovým a náramkovým TLD merať hodnoty od 0,1 mSv do 20 Sv s presnosťou do $\pm 35\%$.

TLD dozimetre SLM



- Výsledok merania odozvy uvedených TLD je podľa Nariadenia vlády č. 345/2006 Z.z. uvádzaný v jednotkách Sievert (Sv) ako:
 - **osobný dávkový ekvivalent $H_p(10)$**
osobný dávkový ekvivalent v hĺbke 10 mm
 - **ekvivalentná dávka v očnej šošovke $H_p(3)$**
osobný dávkový ekvivalent v hĺbke 3 mm
 - **ekvivalentná dávka v koži a končatinách $H_p(0,07)$**
osobný dávkový ekvivalent v hĺbke 0,07 mm
 - **osobný dávkový ekvivalent od neutrónov $H_{pn}(10)$**
- Z hodnôt vyššie uvedených veličín sa dá stanoviť aj efektívna dávka z externých zdrojov $I\dot{Z} (E_{ext})$.
- Bez bližšej špecifikácie ožarovacích podmienok možno uvedenými celotelovými osobnými TLD merať hodnoty od 0,05 mSv do 20 Sv s presnosťou lepšou ako $\pm 35\%$.
- Odozva TLD mierne klesá s časom a pri spracovaní nameraných dát sa uvažuje s korekciou.

Fyzikálne parametre TLD



- TLD z LiF materiálov, používané pri vyhodnocovaní systémov HARSHAW 6600 sú charakterizované veľmi dobrou **lineárnou závislosťou odozvy** dávky v rozsahu od 0,01 mGy do 1 Gy a supralineárnou závislosťou od 1 do 20 Gy.
- Súčasne sú charakteristické **nízkou energetickou závislosťou** v oblasti pod 100 keV (30 keV/ ^{137}Cs = cca 1,3) a prakticky nezávislosťou odozvy v celom vyššom rozsahu energií detekovaného gama žiarenia.
- Odozva meraného signálu TLD voči prijatej dávke nelineárne klesá s časom, ale pri vyhodnocovaní je korigovaná diferencovanou kalibráciou pre rôzne typy dozimetrov a rôzne doby expozície.

Fyzikálne parametre TLD – vplyv okolia



- Vzhľadom na integračný charakter TLD, každý integruje aj informáciu o dávke z externého $I\dot{Z}$ z prírodných zdrojov, t.j. aj v dobe, keď ho pracovník nepoužíva priamo pri práci so zdrojmi $I\dot{Z}$, ako aj počas jeho uloženia a transportu od užívateľa do OOD SLM a späť.
- **Úroveň prírodného pozadia** v našej zemepisnej oblasti, na základe dlhodobých meraní TL dozimetrami sa pohybuje od cca 0,04 do 0,08 mSv/ mesiac, v závislosti od časových variácií kozmického žiarenia a skutočných radiačných parametrov okolia.
- Informáciu o dávke môže nepriaznivo ovplyvniť tiež **teplota** okolia (vysoké teploty nad 35°C) a ďalšie fyzikálne podmienky (priame UV žiarenie, el. výboj a pod.) ako aj **znečistenie** citlivých častí TLD (mastné kyseliny, prach a pod.). Je dôležité preto chrániť TLD pred všetkými škodlivými vplyvmi prostredia, puzdra zbytočne neotvárať a TLD udržiavať v čistote.

Výhody TLD Dozimetrie:

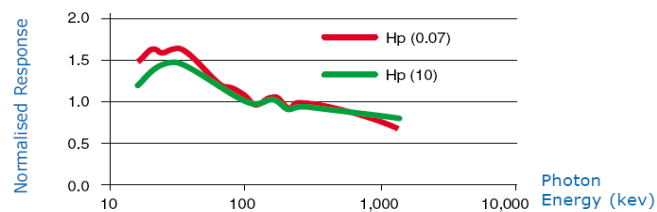
1. Široký **interval** merania dávok gama žiarenia.
2. Vysoká **citlivosť**, jednoduché použitie, malé rozmery.
3. **Malý fading** (strata údajov), čo umožňuje dlhodobé použitie.
4. Vyhodnocovaný svetelný signál je priamo **úmerný** absorbovanej dávke čo uľahčuje kalibráciu meraní.
5. LiF kryštál je pre osobnú dozimetriu gama žiarenia vhodný **tkanivu ekvivalentný** materiál. (To neplatí pre neutróny. Svetelný signál je veľmi závislý od energie neutrónov).

Nevýhody TLD dozimetrov.

1. Vyhodnocovanie dozimetrov **zničí** nameraný záznam a preto môže byť vykonané len raz.
2. Bez vyhodnocovania sa nedá povedať, či bol detektor ožiarený alebo nie. Je treba všetky dozimetre **vyhodnotiť** a žihaním pripraviť pre použitie v ďalšom období.
3. Prach na detektore môže pri vyhodnocovaní splať a byť zaregistrovaný ako **falošný** signál.
4. TLD materiál je citlivý na **UV** svetlo a preto musí byť uzavretý do nepriehľadného obalu.

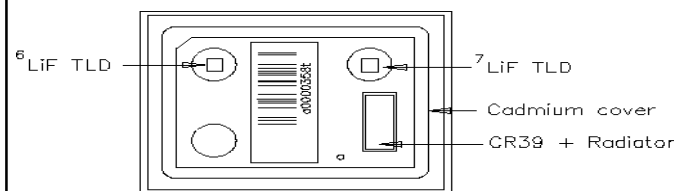
Gama a beta TLD dozimetre

Detection	X-ray and Gamma-ray	Beta Particles
Dose Range Measured	0.05 mSv to 10 Sv	0.05 mSv to 10 Sv
Energy Range Detected	10 keV to 10 MeV for Hp (0.07) 15 keV to 10 MeV for Hp (10)	700 keV to 3.5 MeV (E_{max}) for Hp (0.07)
Periods of Use	2, 4, 8, 13 weekly (calendar issue periods are also available)	2, 4, 8, 13 weekly (calendar issue periods are also available)



Závislosť odozvy TLD dozimetra od energie pre Hp(10) a Hp(0.07) normalizovaná k žiareniu cézia-137 na hodnotu 0,9.

TLD osobný dozimeter neutrónov



Izotopy ^6Li a ^7Li sú citlivé na beta a gama žiarenie.
Len ^6Li je citlivý na tepelné neutróny (0.025 eV to 0.6 MeV) reakciou

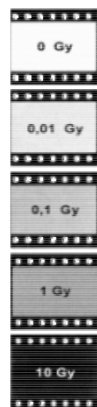


Dozimeter obsahuje tabletky ^7LiF a ^6LiF . Celý je pokrytý kadmiovým plieškom aby odtienil priame pomalé neutróny. Detektor potom detekuje iba neutróny, ktorých zdrojom sú nadtepelné neutróny, spomalené v tele pracovníka a odrazili sa z vnútra tela späť do detektora. Taký dozimeter sa nazýva **albedo** dozimeter. Na detekciu rýchlych neutrónov sa používa stopový detektor CR39+radiator.

Filmové dozimetre



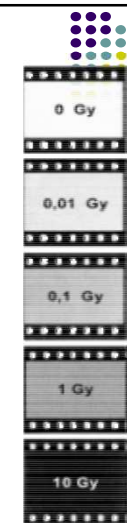
- Ich činnosť je založená na schopnosti ionizujúceho žiarenia spôsobiť sčernenie citlivej fotografickej vrstvy (vytvorenej suspenziou zrn halogenidov striebra AgBr v želatíne).
- Stupeň sčernenia citlivej vrstvy je úmerný dávke žiarenia, ktoré na ňu dopadne a vyhodnocuje sa densitometrom.
- Za predpokladu správnej expozície (spredu) je citlivosť filmových dozimetrov na fotóny ($E > 0,1 \text{ MeV}$) 0,10 mGy až 0,15 Gy pre rutinnú dozimetriu a 0,05 Gy až 10 Gy pre dozimetriu havarijnú.



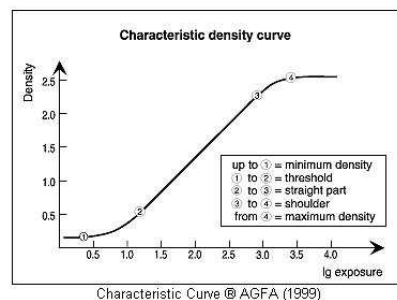
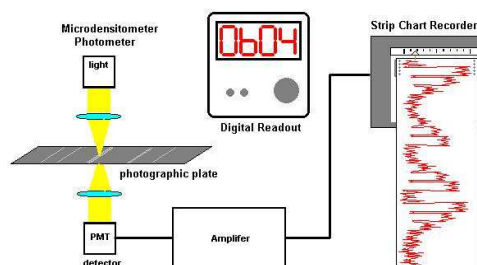
Neistoty merania filmovými dozimetrami

- Neistoty v údajoch filmových dozimetrov súvisia najmä s týmito faktormi:
 - energetická závislosť filmu,
 - smerová závislosť veľkosti sčernenia od dávky,
 - nepresnosť pri ciachovaní,
 - nehomogenita emulzie a
 - chyby merania optickej hustoty densitometrom.

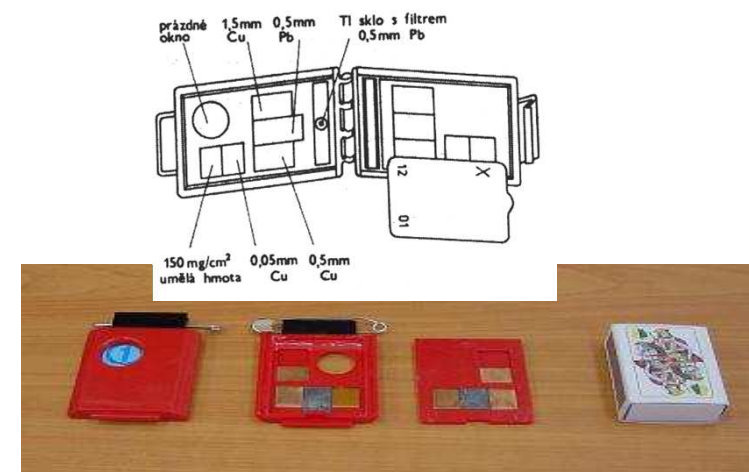
Citlivosť filmových dozimetrov			
Typ žiarenia	Rutinná dozimetria	Havarijná dozimetria	Presnosť merania
γ ($E > 0,1 \text{ MeV}$)	0,1-150 mGy	0,05-10 Gy	$\pm 25 \%$
β ($E > 0,7 \text{ MeV}$)	0,1-150 mGy	0,05-10 Gy	$\pm 25 \%$



Vyhodnocovanie filmových dozimetrov



Filmové dozimetre s filtrami



Základné metódy osobnej dozimetrie



filmová dozimetria (FD)

Detekčný limit: 0,1mSv

- + permanentný záznam
možnosť určenia smeru ožiarenia
- citlivosť na vonkajšie vplyvy (teplo, vlhko)
- obmedzená možnosť doby monitorovania
- fading
- komplikovaný a zdĺhavý proces vyhodnotenia



termoluminiscencia (TLD)

Detekčný limit: 0,1mSv

- + necitlivosť na vonkajšie vplyvy
- + nízky fading
- + malé rozmery detektora
- + neposkytuje permanentný záznam
- nemožnosť určenia smeru ožiarenia
- náročný proces vyhodnocovania
(ale rýchly a s možnosťou automatizácie)

Základní metody osobní dozimetrie



opticky stimulovaná luminiscencia (OSL)

Detekčný limit: 0,05mSv

- + necitlivosť na vonkajšie vplyvy (teplo, vlhko)
- + permanentný záznam
- + možnosť určenia smeru ožiarenia
- + rýchly proces vyhodnotenia s možnosťou automatizácie
- + možnosť priebežného vyhodnocovania
- citlivosť na intenzívne svetlo (detekčný materiál musí byť v púzdre)



elektronické osobné dozimetre (EPD)

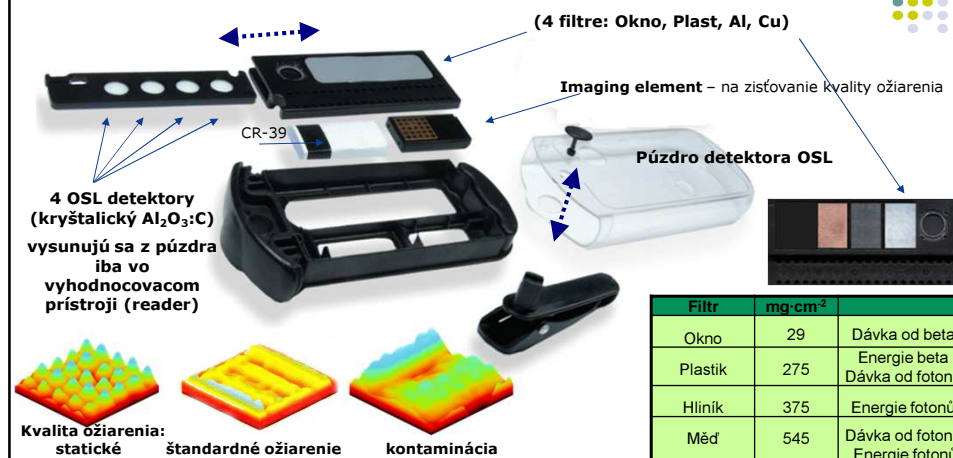
- + zobrazenie aktuálnej hodnoty
- + možnosť využitia alarmu
- + elektronické zariadenie napájané batériou
- nemožnosť určenia smeru ožiarenia
- potreba nadstavbového systému pre evidenciu dávok
- komplikovaná kalibrácia

Základný princíp OSL je podobný na TLD

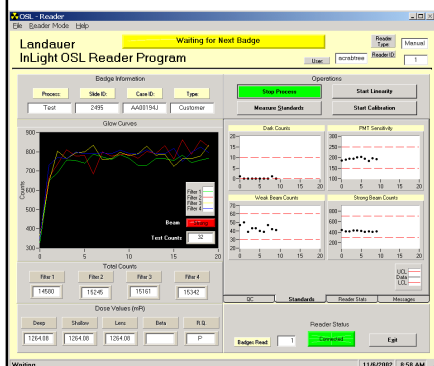


- Materiál detektora je zafír $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$
- Po ožiarení detektora dochádza k zachytu excitovaných elektrónov v elektrónových pascách
- Pri vyhodnotení dochádza ku stimulácii detektora zeleným svetlom LED diódy (532nm) a uvoľneniu zachytených elektrónov z pascí. Prechod elektrónov do základného stavu je sprevádzaný emisiou modrého svetla (420nm).
- Vyžiarené svetlo je úmerné obdržanej dávke

Celotelový dozimeter LANDAUER typ InLight



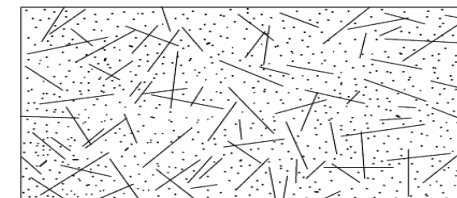
Vyhodnocovacie zariadenie – reader InLight 200a



Zásobníky s kazetami na 200ks (4x50ks) dozimetrom

Stopové detektory

- Žiarenie pri interakcii v tuhých látkach vytvára reťazové defekty - stopy (tracks), ktoré sú viditeľné pod elektrónovým mikroskopom, alebo po chemickom leptaní sa dajú zväčšiť a sú viditeľné aj pod obyčajným mikroskopom.
- Sú vhodné hlavne na meranie nabitých častíc a neutrónov (hlavne meranie radónu v ovzduší).
- Dávka sa určuje počítaním stôp na jednotke plochy detektora.



Positions of Measured Particle Tracks in the Cellulose Nitrate (CN) Layer of the PNTD Stack Flown on Cosmos-936

Aktivačné detektory

Sa používajú na určovanie hustoty toku neutrónov (ϕ) a energetického spektra neutrónov, od ktorých závisí indukovaná aktivita A_i v materiáli aktivačného detektora.

$$A_i = (1 - e^{-\lambda t}) \cdot \phi \cdot \sigma_a \cdot \frac{p \cdot N_A \cdot M}{A}$$

σ_a - účinný prierez aktivácie

p - obsah nuklidu na 1 kg prvku

N_A - Avogadrova konštanta

M - hmotnosť prvku v detektore

A - atómová hmotnosť

Charakteristiky aktivačných detektorov

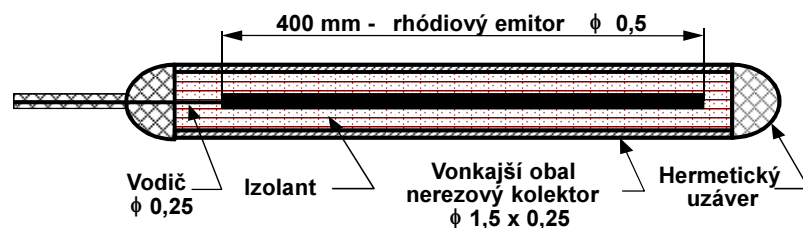
Vybrané prahové aktivačné detektory

Prvok	$T_{1/2}$	Prah (MeV)
$^{19}\text{F}(n,2n)$	109,7 min	11,6
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)$	15,0 h	4,9
$^{27}\text{Al}(n,p)$	9,46 min	3,8
$^{64}\text{Zn}(n,p)$	12,7 h	2,0
$^{115}\text{In}(n,n')$	4,5 h	0,5
$^7\text{Li}(n,\alpha)$	12,3 r	3,8
$^{24}\text{Mg}(n,p)$	15,0 h	6,0

Aktivačné detektory tepelných neutrónov

Prvok	$T_{1/2}$	Prvok	$T_{1/2}$
^{55}Mn	2,58 h	^{107}Ag	2,3 min
^{59}Co	10,4 min	^{115}In	54,1 min
^{63}Cu	12,87 h	^{164}Dy	1,3 min
^{65}Cu	5,14 min	^{197}Au	2,695 d

Schéma samonapájacieho detektora



Materiál emitorov: Rh, Pt, Hf, V, Co, Ag

Používané izolátory: Al_2O_3 , MgO ($R_{300^\circ\text{C}} = 10^8 \Omega$)

Materiál kolektorov: nerez, inconel 600 (Ni 60%, Cr 23%, Fe15%)

Charakteristiky emitorov

Emitter Material	Rhodium	Vanadium	Cobalt	Hafnia (HfO_2)	Silver	Platinum
Emitter Diameter mm	0.46	2.0	2.0	1.24	0.65	0.51
Emitter Length mm	400	100	210	7000	7000	3050
Insulator Type	Al_2O_3	Al_2O_3	Al_2O_3	MgO	MgO	Al_2O_3
Collector Material	Inconel	Inconel	Inconel	Stainless Steel	Stainless Steel	Inconel
Collector Diameter mm	1.57	3.5	3.5	3.0	3.0	1.6
Thermal Neutron Sensitivity A/nv	3.6×10^{-20}	4.8×10^{-21}	5.4×10^{-21}	7.9×10^{-20}	42×10^{-20}	2.5×10^{-22}
Co^{60} Gamma Sensitivity A/R/HR	7.0×10^{-17}	4.0×10^{-17}	5.6×10^{-17}	2.8×10^{-16}	13.5×10^{-16}	3.4×10^{-16}
Insulation Resistance ohms						
20°C	$> 10^{12}$	$> 10^{12}$	$> 10^{12}$	$> 10^{10}$	$> 10^9$	$> 10^{12}$
300°C	$> 10^8$	$> 10^8$	$> 10^8$	$> 10^8$	$> 10^7$	$> 10^8$
Response Time (0-63%)	1.1 Minutes	5.5 Minutes	Prompt	Prompt	0.5 Minutes	Prompt
Burn-up Rate %/month at 10^{13} nv	0.39	0.01	0.09	0.30	0.16	0.03

Charakteristiky materiálov emitorov

Emitter Material	Stable Isotope	% Composition	Activation Cross-section (barns)	Resulting Nuclide	Half-life
Vanadium	$^{23}\text{V}^{50}$	0.24	100	$^{23}\text{V}^{51}$	Stable
	$^{23}\text{V}^{51}$	99.76	4.9	$^{23}\text{V}^{52}$	3.76 Minutes
Rhodium	$^{45}\text{Rh}^{103}$	100	11(8%) 135(92%)	$^{45}\text{Rh}^{104m}$ $^{45}\text{Rh}^{104}$	4.4 Minutes 42 seconds
Cobalt	$^{27}\text{Co}^{59}$	100	37	$^{27}\text{Co}^{60}$	5.27 years
Hafnia	$^{72}\text{Hf}^{174}$	0.18	390	$^{72}\text{Hf}^{175}$	70 days
	$^{72}\text{Hf}^{176}$	5.20	15	$^{72}\text{Hf}^{177m}$	51.4 min
	$^{72}\text{Hf}^{177}$	18.50	380	$^{72}\text{Hf}^{178m}$	31 years
	$^{72}\text{Hf}^{178}$	27.14	75	$^{72}\text{Hf}^{179m}$	25.1 days
	$^{72}\text{Hf}^{179}$	13.75	65	$^{72}\text{Hf}^{180m}$	5.5 hours
	$^{72}\text{Hf}^{180}$	35.23	14	$^{72}\text{Hf}^{181m}$	42.4 days
Silver	$^{47}\text{Ag}^{107}$	51.82	35	$^{47}\text{Ag}^{108}$	2.42 min
	$^{47}\text{Ag}^{109}$	48.18	93	$^{47}\text{Ag}^{110}$	24.4 seconds
Platinum	$^{78}\text{Pt}^{192}$	0.78	14	$^{78}\text{Pt}^{193m}$	4.3 days
	$^{78}\text{Pt}^{194}$	32.90	2	$^{78}\text{Pt}^{195m}$	4.1 days
	$^{78}\text{Pt}^{195}$	33.80	24	$^{78}\text{Pt}^{196}$	Stable
	$^{78}\text{Pt}^{196}$	25.30	1	$^{78}\text{Pt}^{197m}$	1.3 hours
	$^{78}\text{Pt}^{198}$	7.22	4	$^{78}\text{Pt}^{199}$	30.8 min.

Použitie SPND

- Mapovanie hustoty toku neutrónov v aktívnej zóne
- Regulácia reaktora (okamžité SPND)
- Lokálna ochrana aktívnej zóny (okamžité SPND v LWR, RBMK)

Charakteristiky rhódiového emitora ^{103}Rh



- ^{103}Rh charakterizuje reakcia (n, β) s účinným prierezom 145 barn pre tepelné neutróny a rezonanciou pri $E=1,25$ eV.
- Burn-up rate (vyhorenie) dosahuje **0.39%** za mesiac v poli tep. neutrónov s hustotou toku $10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.
- Beta emisie s energiou 2.44 MeV.
- SPND s rhódiovým emitorm má relatívne vysokú senzitivitu ale vysoké vyhorenie,
- 92% signálu má polčas premeny 42 s.
- 8% signálu má polčas premeny 4.4 min.

SPND na báze ^{51}V



- ^{51}V má účinný prierez **n-beta** interakcie s tepelnými neutrónmi 4.9 barnov
- 1/v závislosť účinného prierezu bez rezonancií v oblasti tepelných a epitepelných neutrónov.
- Rýchlosť vyhorenia je nízka **0.012%/mesiac** v poli tep. neutrónov s hustotou toku $10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.
- 99% signálu má polčas rozpadu 3.76 minutes, 1% signálu je okamžitá.
- Paralelná beta emisie 2.6 MeV.
- Má relatívne nízku citlivosť a malú rýchlosť vyhorenia,
- Veľmi oneskorený signál.

SPND na báze ^{195}Pt



- ^{195}Pt has a **n-gamma** interaction with a 24 barn thermal neutron cross-section and a parallel gamma-photon reaction.
- The burn-up rate is 0,03%/month in a thermal neutron flux of $10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.
- The signal is **prompt** and has both neutron and gamma components.
- A SPND with a platinum emitter is sensitive to both gamma and neutron fluxes with **93% of the signal current due to gamma flux** response and **7% due to neutron flux** response in a typical light water reactor core.
- A SPND with a platinum emitter has a relatively low sensitivity, low burn-up rate and a prompt signal.

SPND na báze ^{59}Co



- ^{59}Co má n-gamma interakciu s účinným prierezom 37 barn pre tepelné neutróny.
- Rýchlosť vyhárana je 0,094%/mesiac v poli tepelných neutrónov $10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.
- Signál je okamžitý ale vyžaduje si dlhodobú kompenzáciu signálu od vznikajúcich izotopov ^{60}Co and ^{61}Co .
- Má relatívne nízku senzitivitu, strednú rýchlosť vyhorenia a okamžitú odozvu.

SPND na báze Hf

- Hf has a n-gamma interaction with a 115 barn thermal neutron cross-section and parallel gamma-photon reaction.
- The average burn-up rate is 0.3%/month in a thermal neutron flux of $10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.
- 96% of the signal is prompt, 4% of signal is delayed as gamma-radiation from fission products.
- A SPND with a hafnia emitter has relatively low sensitivity, high burn-up rate, perturbs the local power density and has a prompt signal.

SPND na báze Ag

Ag has a n-beta interaction with a 64.8 barn cross-section for thermal neutrons and a few resonances in the range 5-134 eV.

The burn-up rate is 0.16%/ month in a thermal neutron flux of $10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

66% of the initial signal has a half-life of 24.4 seconds.

25% of the signal has a half-life of 2.42 minutes.

9% of the signal is a prompt signal.

A SPND with a silver emitter has an average sensitivity, average burn-up rate, average perturbation of local power density and has a (two-fold) delayed signal.

DOZIMETRE MERANIE KERMY A DÁVKY.

Vzťah medzi dávkou resp. kermou a aktivitou bodového žiariča

$$\dot{D} = konst \cdot \frac{A}{r^2} \quad \dot{K} = \Gamma \cdot \frac{A}{r^2}$$

D - je dávkový príkon, v praxi obvykle v $[\text{mGy/h}]$ ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} \times \text{kg}^{-1}$),

konst - je koeficient úmernosti, závislý od druhu rádionuklidu (výťažku emitovaných fotónov s energiou *E*), ako aj na absorpčných vlastnostiach absorbujúcej látky; obvykle sa udáva v jednotkách $[\text{mGy} \cdot \text{m}^2 / \text{h} \cdot \text{GBq}]$ a pre kermu alebo expozíciu sa označuje Γ

K - je kermový príkon $[\text{mGy/h}]$

Γ - gama konštanta, konštanta vzdušného kermového príkonu

A - je aktivita zdroja - musí byť definované jeho rádionuklidové zloženie; $[\text{GBq}]$

r - je vzdialenosť od zdroja; $[\text{m}]$.

Γ - gama konštanta, konštanta vzdušného kermového príkonu

Predstavuje vzdušný kermový príkon vo vzdialenosti 1 m od bodového zdroja s aktivitou 1 Bq.

$$K = \Psi \cdot \mu_{tr,m} = \Phi \cdot E \cdot \mu_{tr,m} = F_K \cdot \Phi$$

$$\Gamma = \dot{K} (A = 1 \text{ Bq}, r = 1 \text{ m}) = \varphi \cdot E \cdot \frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{\dot{n} \cdot E}{4\pi r^2} \cdot \frac{\mu_{tr}}{\rho}$$

Toto je výraz pre výpočet gama konštanty pre prípad zdroja emitujúceho fotóny o energii E s výťažkom $\gamma=100\%$. Vo všeobecnosti treba spočítať sumu všetkých fotónov s prihliadnutím na ich energie a výťažky.

Gama konštanta pre zdroj emitujúci fotóny s energiou E

Bodový zdroj s aktivitou 1 GBq (t.j. 10^9 premien za sekundu) so 100% výťažkom fotónov s energiou E [MeV] vysiela do priestoru (priestorový uhol 4π) $3,6 \times 10^{12}$ fotónov za hodinu. Tieto fotóny predstavujú za 1 hodinu energiu $3,6 \times 10^{12} \times E \times 10^6 \times 1,602 \cdot 10^{-19}$ [J], ktorá sa šíri priestorom a v danom mieste sa odovzdá látke s hmotnostným koeficientom prenosu energie (μ_{tr}/ρ) [m^2/kg].

Pre monoenergetický žiarič so 100% výťažkom fotónov s energiou E dostaneme:

$$\Gamma \left[\frac{\text{mGy} \cdot \text{m}^2}{\text{h} \cdot \text{GBq}} \right] = \frac{3,6 \cdot 10^{12} \cdot E \cdot 10^6 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}}{4\pi} \cdot \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) = 0,0459 \cdot E \cdot \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)$$

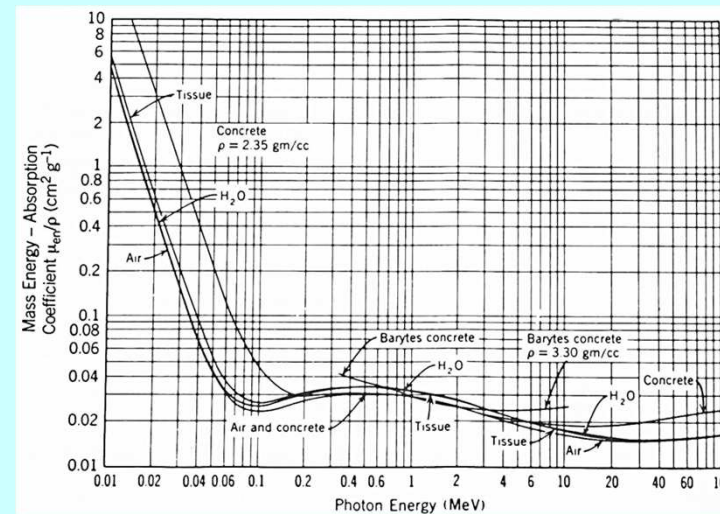
Kermová gama konštanta pre cézium ^{137}Cs

Napríklad pre ^{137}Cs s 85% výťažkom na energii 662 keV a 6,5% na 32,7 keV dostaneme konštantu vzdušného kermového príkonu:

$$\begin{aligned} \Gamma_{Cs} &= 0,0459 \cdot (0,662 \cdot 0,85 \cdot 0,00293 + 0,0327 \cdot 0,065 \cdot 0,0125) = \\ &= 0,077 \frac{\text{mGy} \cdot \text{m}^2}{\text{h} \cdot \text{GBq}} = 2,13 \cdot 10^{-17} \frac{\text{Gy} \cdot \text{m}^2}{\text{s} \cdot \text{Bq}} \approx 90,2 \text{ fW} \cdot \text{Bq}^{-1} \end{aligned}$$

Treba zdôrazniť, že ak bude absorbujúcou látkou niečo iné ako vzduch (napr. voda), tento údaj sa trochu zmení, pretože sa zmenia hodnoty transportných koeficientov, takže pri presných meraniach treba zmenu absorbujúcej látky zohľadniť.

μ_{en}/ρ



Dávka pre fotónové žiarenie

$$D = \Phi \cdot E \cdot (\mu_{en}) / \rho$$

kde

Φ - fluencia fotónov, m^{-2}

μ_{en}/ρ – hmotnostný koeficient absorpcie energie, m^2/kg

Vzťah platí v materiáli za podmienky **rovnováhy**, teda vtedy, keď kinetická energia, počet a smery šírenia sekundárnych **elektrónov**, vznikajúcich v dôsledku ožiarenia sú v meranom objeme materiálu homogénne.

Pre daný materiál môžeme tiež napísať:

$$D_{mat} = \Phi_{mat} \cdot \left(\frac{S_{col}}{\rho} \right)_{mat} = \Phi_{mat} \cdot S_{mat}$$

Princíp Bragga - Graya

Ak detektor žiarenia nedeformuje rovnováhu v meranom objeme, môžeme považovať dávku v detektore rovnú dávke v materiáli. Rovnováha v detektore nastáva vtedy, keď elektróny opúšťajúce detektor sú dopĺňané elektrónmi vznikajúcimi v stene detektora (ak je stena hrubšia ako je dolet elektrónov). Potom dávka v materiáli D_{mat} môže byť stanovená meraním dávky v detektore D_{det} pričom:

$$D_{mat}/D_{det} = S_{mat}/S_{det}$$

$$D_{mat} = w \cdot N \cdot S_{mat}/S_{det}$$

$$D_{mat} = 34 \cdot \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{mat} \cdot X \cdot \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air}$$

w – stredná energia potrebná na vytvorenie jedného iónového páru (ip) v jednotke hmotnosti materiálu detektora J/ip

$S_{mat, det}$ – hmotnostná brzdná schopnosť v meranom materiáli resp. detektore $J \cdot m^2/kg$

N – počet iónových párov vznikajúcich v detektore na jednotky hmotnosti, ip/kg

Napríklad pomer hmotnostnej brzdné schopnosti vody a vzduchu ($MeV \cdot cm^2/g$) je 1,85/1,66=1,11

Preto:

$$D_{voda} = 1,11 \cdot D_{vzduch}$$

Dávkový príkon od bodového zdroja

$$\dot{D} = \Psi \frac{\mu_{en}}{\rho} = \frac{A \cdot E \cdot y}{4 \pi r^2} \cdot \frac{\mu_{en}}{\rho}$$

- μ_{en}/ρ v širokom intervale energií (od 60keV do 2 MeV) a pre mnohé materiály je približne rovnaké = **0,0027 m^2kg^{-1}**
- E uvedené v elektrónvoltoch treba previesť na Joule, $1eV=1,6022 \cdot 10^{-19} J$

$$\dot{D} [Gy \cdot s^{-1}] = \frac{A \cdot E (eV) \cdot y \cdot 1,6022 \cdot 10^{-19}}{4 \pi r^2} \cdot 0,0027 = 3,44 \cdot 10^{-23} \cdot \frac{AEy}{r^2}$$

$$\dot{D} [\mu Gy \cdot h^{-1}] = 1,24 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{A [MBq] \cdot E [keV] \cdot y}{r^2}$$

Tabuľka vybraných kermových konštánt

RN	Doba polpremeny, rok	Interval energií od – do, MeV		Γ_K mikroGy m^{-2} GBq $^{-1}$ h $^{-1}$
⁶⁰ Co	5.271	1.1732	1.3325	309.0
¹³⁷ Cs/ ¹³⁷ Ba	30.04	0.0045	0.6617	82.10
²⁴¹ Am	432.2	0.0139	0.1030	3.97

Výpočet príkonu absorbovanej dávky od ^{137}Cs

A = 1 GBq
E = 661,7 keV
r = 1 m

$$\dot{D} \left[\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1} \right] = 1,24 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{A \left[\text{MBq} \right] \cdot E \left[\text{keV} \right] \cdot y}{r^2}$$

$$\dot{D} = 1,24 \cdot 10^{-4} \cdot 1000 \cdot 661,7 \cdot 0,85 = 70 \mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$$

Meranie dávkového príkonu ionizačnou komorou v prúdovom režime

$$D = \Psi \cdot \mu_{E,m} = \Phi \cdot E \cdot \mu_{E,m}$$

$$D \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right] = \frac{E_{\text{abs}}}{m} = \frac{E_{\text{abs}}}{V \cdot \rho}; \quad n = \frac{E_{\text{abs}}}{w}; \quad Q = n \cdot e$$

kde

E_{abs} – energia absorbovaná v detektore

w je priemerná energia na vytvorenie jedného iónového páru vo vzduchu,
e je náboj elektrónu; ak sa energia na vytvorenie iónového páru uvedie v eV,

Q – náboj vytvorený v detektore

n – počet iónových párov

m je hmotnosť vzduchu s hustotou ρ v komore s objemom V.

Vyjadrenie dávkového príkonu s použitím stredných hodnôt resp. pri ustálenom stave

$$\dot{D} = k \cdot I \quad k = \frac{\dot{D}}{I} = \frac{D}{t} \cdot \frac{t}{Q} = \frac{D}{Q} = \frac{E_{\text{abs}}}{V \cdot \rho \cdot \frac{E_{\text{abs}}}{w} \cdot e}$$

$$k = \left(\frac{w}{e} \right) \cdot \frac{1}{m} = \left(\frac{w}{e} \right) \cdot \frac{1}{V \cdot \rho}$$

k – je vlastne prevodová konštanta (**kalibračný faktor**) ionizačnej komory, jednotka je $\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1} / \text{A} = \text{Gy/C}$

Na vytvorenie jedného iónového páru pri ionizácii vzduchu sa v priemere spotrebuje energia $w = 34 \text{ eV}$, ktorá takmer nezávisí od energie fotónu, ktorý ionizáciu spôsobil.

Teoretický výpočet kalibračného faktora ionizačnej komory

$$k = \left(\frac{w}{e} \right) \cdot \frac{1}{m} = \left(\frac{w}{e} \right) \cdot \frac{1}{V \cdot \rho}$$

Vzduchová ionizačná komôrka s objemom $V = 0,125 \text{ cm}^3$ má v normálnych podmienkach ($\rho = 1,21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) kalibračnú konštantu:

$$k = \frac{34 \cdot eV}{1,25 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot 1,21 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}} = 2,25 \cdot 10^8 \text{ Gy/C}$$

Príkon absorbovanej dávky 1 Gy/s v takej ionizačnej komore spôsobí prúd $4,4 \text{ nA}$.

Rádionuklidy vhodné na kalibráciu dozimetrov

RN	Polčas (rokov)	Energia gama, (keV)	Kermová konštanta gama (mGy.m ² .h ⁻¹ . MBq ⁻¹)	Merná aktivita, (Bq.kg ⁻¹)	Doporučená chemická forma
⁶⁰ Co	5,272	1173,3 1332,5	308	3,7.10 ¹⁵	kov
¹³⁷ Cs	30,1	661,6	76,8	8,51.10 ¹⁴	chlorid
²⁴¹ Am	433	59,54	3,76	1,11.10 ⁴	oxid

Kalibrácia dozimetrov

- Vo všeobecnosti kalibrácia dozimetrov predstavuje stanovenie odozvy dozimetrov na jednotkovú dávku.
- Odozva dozimetrov závisí od množstva parametrov a preto môže byť stanovená ako funkcia mnohých premenných:
 - veľkosť dávky – odozva nemusí byť lineárna
 - energetická a uhlová závislosť odozvy
 - závislosť na teplote
 - podmienky vyhodnocovania, fading...

doc. Ing. Róbert Hinca, PhD.

MERANIE POVRCHOVEJ KONTAMINÁCIE (PLOŠNEJ AKTIVITY)

Príklad pre meranie a analýzu neistôt merania povrchovej kontaminácie (plošnej aktivity)

- Na meranie sa vzťahuje norma IEC 60325:2002 - Radiation protection instrumentation – Alpha, beta and alpha/beta (beta energy > 60keV) contamination meters and monitors.
- V príklade budeme uvažovať kontamináciu povrchu nuklidom ¹⁴C.
- Merací rozsah v impulzoch za sekundu : $(10 \pm 10\,000) \text{ s}^{-1}$
- Plocha detektora: 100 cm^2

Model function – funkcia pre výpočet aktivity obecné

$$M = F \cdot K \cdot (C - B)$$

M – meraná veličina, teda plošná aktivita v Bq.m⁻²

F – kalibračný faktor Bq.m⁻²/s⁻¹=Bq.m⁻².s

K – korekčný faktor

C – indikovaná hodnota s⁻¹

B – pozadie

Model merania – funkcia pre výpočet aktivity

$$A = F \cdot \frac{(C - B)}{D} \cdot K_n K_{HV} K_{temp} K_{hum} K_{d,air} K_{d,geo} K_{uni} K_{sur}$$

- A – nameraná hodnota plošnej aktivity ¹⁴C, Bq.cm⁻²
- B – nameraná hodnota pozadia, s⁻¹
- C – nameraná hodnota početnosti impulzov, s⁻¹
- D – plocha detektora v cm²
- F – kalibračný faktor pre referenčný beta rádionuklid, Bq.cm⁻²/s⁻¹
- K_n – korekčný faktor pre nelinearitu
- K_{HV} – korekčný faktor pre nestabilitu zdroja napájania
- K_{temp} – korekčný faktor pre okolitú teplotu
- K_{hum} – korekčný faktor pre vlhkosť
- K_{d,air} – korekčný faktor pre absorpciu vo vzduchu medzi detektorom a vzorkou
- K_{d,geo} – korekčný faktor pre geometriu merania
- K_{uni} – korekčný faktor pre nehomogenitu kontaminácie (non-uniformity)
- K_{sur} – korekčný faktor na absorpciu beta na povrchu

Celkový výsledok merania plošnej aktivity

- Výpočet hodnôt K_{uni} a K_{sur} nie je v norme špecifikovaný.
- Nech sú v príklade nasledovné hodnoty:
- C = 1600 s⁻¹
- B = 4 s⁻¹
- D = (100 ± 1)cm²
- F=(40 ± 8) Bq.cm⁻²/s⁻¹
- d = (10 ± 2) mm - vzdialenosť detektor vzorka
- Pri kalibrácii bola vzdialenosť detektor vzorka 5 mm.
- Toto treba vziať do úvahy pri výpočte K_{d,air} a K_{d,geo}

Vplyv vzdialenosti K_{d,air}

- Norma nešpecifikuje vzdialenosť povrch - detektor počas merania, my budeme uvažovať 10mm.
- Vzdialenosť počas merania nie je fixovaná.
- Pre nízkoenergetické beta žiarenie, ako je to u ¹⁴C (155 keV), je presná vzdialenosť významná.
- Pri zmene vzdialenosti na 8mm, 10mm a 12mm sa mení účinnosť o 15%, 19% a 23%.
- Potom K_{d,air} sa mení v rozmedzí od 1/(1-0,15) do 1/(1-0,23) teda od 1,18 do 1,3. Platí: K_{d,air} = 1,24 ± 0,06

Vplyv vzdialenosti $K_{d,geo}$



- Zmena vzdialenosti mení uhol medzi detektorom a zdrojom – priestorový uhol (solid angle).
- Pre nekonečný rovnomerne kontaminovaný povrch bude vplyv zmeny vzdialenosti na uhol nulový. Naopak najväčší bude pre bodový zdroj.
- Budeme uvažovať zmenu vzdialenosti v rozmedzí (10 ± 2) mm od veľkoplošného detektora $100\text{mm} \times 100\text{mm}$. Účinnosť v tomto prípade bude nižšia o $(10 \pm 2)\%$, potom $K_{d,geo} = 1,11 \pm 0,02$.
- Takúto zmenu potom môžeme považovať za najvyšší odhad vplyvu geometrie pri meraní v rozmedzí vzdialeností od 5mm do 15 mm.

Vplyv nehomogenity, K_{uni}



- Vplyv nie je v norme presne špecifikovaný.
- Nehomogenity rozloženia aktivity sa dajú identifikovať inými meraniami. Vieme zobrať do úvahy nehomogenitu detekcie žiarenia v detektore.
- Tieto dve hodnoty sú pre dané meranie porovnateľné a boli stanovené na $K_{uni} = 1,0 \pm 0,025$.

Absorbcia na povrchu K_{sur}



- Na povrchu sa môžu nachádzať odstrániteľné mastnoty alebo iné nečistoty.
- Iné vplyvy netreba brať do úvahy
- Uvažujeme, že vrstva je v rozmedzí od $(0 \div 10)$ mg.cm^{-2}
- To predstavuje pre ^{14}C redukciu účinnosti $(0 \div 76)\%$ čo sa znamená že $1 \leq K_{sur} \leq 4,17$ teda $K_{sur} = 2,59 \pm 1,59$

Ostatné korekčné faktory



- Pre tento príklad budeme uvažovať hodnoty ostatných korekčných faktorov na úrovni maximálnej prípustnej hodnoty:
- $K_n = 1,0 \pm 0,1$;
- $K_{hv} = 1,00 \pm 0,01$;
- $K_{temp} = 1,0 \pm 0,05$;
- $K_{hum} = 1,0 \pm 0,025$;

Bilancia neistôt

Veličina	Najlepší odhad	Štandardná neistota	Rozdelenie	Koeficient citlivosti	Príspevok neistoty k výslednej hodnote
C	1600 s ⁻¹	40 s ⁻¹ sqrt(1600)	Normálne	1,43 cm ⁻²	57 s ⁻¹ cm ⁻²
B	4 s ⁻¹	2 s ⁻¹ sqrt(4)	Normálne	1,43 cm ⁻²	3 s ⁻¹ cm ⁻²
D	100 cm ²	0,6 cm ²	Rovnomerné	-22,8cm ⁻⁴	-14 s ⁻¹ cm ⁻²
F	40	8	Normálne	56,9s ⁻¹	455 s ⁻¹ cm ⁻²
K _n	1,0	0,1/√3=0,058	Rovnomerné	2276s ⁻¹ cm ⁻²	132 s ⁻¹ cm ⁻²
K _{HV}	1,0	0,01/√3=0,006	Rovnomerné	2276s ⁻¹ cm ⁻²	13 s ⁻¹ cm ⁻²
K _{temp}	1,0	0,05/√3=0,029	Rovnomerné	2276s ⁻¹ cm ⁻²	66 s ⁻¹ cm ⁻²
K _{hum}	1,0	0,025/√3=0,014	Rovnomerné	2276s ⁻¹ cm ⁻²	32 s ⁻¹ cm ⁻²
K _{d,air}	1,24	0,06/√3=0,035	Rovnomerné	1835s ⁻¹ cm ⁻²	64 s ⁻¹ cm ⁻²
K _{d,geo}	1,11	0,02/√3=0,012	Rovnomerné	2050s ⁻¹ cm ⁻²	25 s ⁻¹ cm ⁻²
K _{uni}	1,0	0,025/√3=0,014	Rovnomerné	2276s ⁻¹ cm ⁻²	32 s ⁻¹ cm ⁻²
K _{sur}	2,59	1,59/√3=0,918	Rovnomerné	879s ⁻¹ cm ⁻²	807 s ⁻¹ cm ⁻²

$$A = (2276 \pm 944) \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$$

Výsledok merania povrchovej emisie

$$A = (2,3 \pm 1,9) \cdot 10^3 \text{ s}^{-1} \text{cm}^{-2}$$

Uvedená rozšírená neistota merania je stanovená vynásobením štandardnej neistoty merania koeficientom rozšírenia k=2, ktorý pre normálne rozdelenie zodpovedá pravdepodobnosti pokrytia približne 95%.

Koeficienty citlivosti charakterizujú ako sa mení výsledok merania pri zmene vstupného parametra $\Delta F/\Delta x_i$ a získava sa ako parciálna derivácia funkcie merania F od vstupného parametra X_i .

$$\text{Potom platí: } \Delta y_i = (\partial F / \partial x_i) \cdot \Delta x_i$$

Kontinuálne monitorovanie aktivity v plynných výpustiach

- IEC 60761-1:2002 Zariadenie pre kontinuálne monitorovanie aktivity v plynných výpustiach. Časť 1: Všeobecné požiadavky.
- IEC 60761-2:2002 Zariadenie pre kontinuálne monitorovanie aktivity v plynných výpustiach. Časť 2: Zvláštne požiadavky pre monitory **aerosólov** vrátane transuránových aerosólov.
- IEC 60761-3:2002 Zariadenie pre kontinuálne monitorovanie aktivity v plynných výpustiach. Časť 3: Zvláštne požiadavky pre monitory **vzácnych plynov**
- IEC 60761-4:2002 Zariadenie pre kontinuálne monitorovanie aktivity v plynných výpustiach. Časť 4: Zvláštne požiadavky pre monitory **iódu**
- IEC 60761-5:2002 Zariadenie pre kontinuálne monitorovanie aktivity v plynných výpustiach. Časť 5: Zvláštne požiadavky pre monitory **trícia**

IEC 60761-2:2002 Časť 2: Zvláštne požiadavky pre monitory aerosólov vrátane transuránových aerosólov.

- Aerosóly sa zo vzdušiny zachytávajú na statický filter alebo kazetu (kártridž) alebo pohyblivý filter, filtračnú pásku pod kruhovou alebo štvorcovou geometriou.
- Pri meraní alfa aktivity je dôležité minimalizovať absorbciu žiarenia vo filtri.
- Zabezpečiť rovnomerné rozloženie aktivity po ploche filtra.
- Zabezpečiť aby sa aerosól neukladal na ostatných častiach zariadenia.
- Treba minimalizovať vplyv pozadia – ⁴¹Ar, ⁸⁵Kr, ¹³³Xe ...
- Zamedziť únikom vzdušiny cez netesnosti.
- Zariadenie má zabezpečiť aj zber vzorky pre doplnkové resp. zálohové laboratórne meranie, použiteľné aj pre overenie správnosti merania.

Meradlo aerosólov. Detektor.

- Veľkosť pracovnej plochy detektora by mala korešpondovať s veľkosťou aktívnej časti meranej vzorky.
 - Pri meraní celkovej aktivity alfa/beta môže byť detektor väčší ako vzorka,
 - pri alfa spektrometrickom meraní by plochy mali byť podobné.
- Detektorové okienko musí byť z materiálu o hrúbke:
 - Pri meraní celkovej aktivity alfa menej ako 2 mg/cm^2 (to zodpovedá ekvivalentnej strate energie 3,2 MeV)
 - Pri meraní celkovej beta aktivity musí hrúbka zodpovedať energetickému spektru meraných častíc. Môže ju stanoviť výrobca.
 - Pri použití alfa spektrometrického merania musí výrobca špecifikovať rozlišovaciu schopnosť zariadenia a vplyv pozadia resp. spôsob kompenzácie prírodných rádionuklidov (radón, tórium - oneskorené meranie).

Referenčný materiál pre kalibráciu

- Pri typovej skúške sa používa rádioaktívny aerosól so stanovenou certifikovanou objemovou aktivitou a známym AMAD (activity median aerodynamic diameter). Napr. $\text{AMAD}=0,4 \text{ }\mu\text{m}$.
- Ako referenčný materiál môžu byť použité rádionuklidy:
 - ^{36}Cl , ^{204}Tl alebo ^{137}Cs pre beta žiarenie
 - ^{239}Pu alebo ^{241}Am pre alfa.
- Rozšírená kombinovaná štandardná neistota referenčných materiálov musí byť menšia ako $\pm 10\%$ ($k=2$).

Referenčná odozva pri meraní aerosólov

- Referenčná odozva sa nesmie líšiť o viac ako 20% od hodnoty deklarovanej výrobcom.
- Pri meraní zmiešanej alfa/beta rádioaktivity nesmie krížová účinnosť (crossover) beta žiarenia v alfa kanáli prekročiť 2% a alfa žiarenia v beta kanáli 25%.

Zmena detekčnej účinnosti pri zmene energie beta žiarenia

- Test sa robí minimálne s tromi zdrojmi:
 - $E_{b,\text{max}} \leq 0,4 \text{ MeV}$ (^{60}Co)
 - $E_{b,\text{max}}$ v rozmedzí od 0,4 do 1 MeV (^{137}Cs)
 - $E_{b,\text{max}} \geq 1 \text{ MeV}$ (^{89}Sr , ^{32}P , ^{90}Y)
- Pre alfa žiarenie sa test nevyžaduje, lebo účinnosť nevykazuje závislosť na energii alfa žiarenia.

Zoznam vhodných beta rádionuklidov pre meradlá aerosolov

Rádionuklid	Polčas	Maximálna energia beta spektra MeV
⁶³ Ni	96 y	0,0659
¹⁴ C	5730 y	0,1565
²⁰³ Hg	46,6 d	0,2122
¹⁴⁷ Pm	2,6234 y	0,2247
⁴⁵ Ca	163 d	0,2569
⁶⁰ Co	5,271 y	0,3179
¹³⁷ Cs	30,0 y	0,51155(94,6%) a 1,1732(5,4%)
¹⁸⁵ W	75,1 d	0,4324
²⁰⁴ Tl	3,779 y	0,7634 (97,4%)
³⁶ Cl	3,01x10 ⁵ y	0,70955 (98,1%)
¹⁹⁸ Au	2,696 d	0,28241 (1,3 %) 0,9607 (98,7%)
⁸⁹ Sr	50,5 d	1,4913
³² P	14,29 d	1,7104
⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Y	29,12 y	0,545 a 2,2839

Beta s energiou menšou ako 0,01MeV a výťažkom menej ako 1% nie je uvedené

Referenčná odozva pri meraní vzácnych plynov

- Relatívna chyba merania nesmie byť väčšia ako 15 % pri štandardných podmienkach merania a pri kalibrácii urobenej v súlade s predpisom výrobcu.
- Merať je možné gama alebo beta žiarenie. Pri gama-spektrometrickom meraní musí výrobca špecifikovať rozlíšenie prístroja.

Zoznam vhodných rádionuklidov pre meradlá vzácnych plynov

Plynný žiarič	Pevný žiarič	E _{beta} stred, MeV	E _{beta} max, MeV	E _{gamma} , MeV	polčas
⁸⁵ Kr	¹⁸⁵ W ²⁰⁴ Tl	0,251	0,67	-	10,72 y
		0,127	0,427	-	75,1d
		0,244	0,766	-	3,779 y
¹³³ Xe	²⁴¹ Am ¹⁸⁵ W	0,101	0,346	0,081	5,245 d
		-	-	0,060	432,2 y
		0,127	0,427	-	75,1 d
¹³⁵ Xe	¹⁴³ Pr ²⁰⁴ Tl ²⁰³ Hg	0,307	0,92	0,25	9,09 h
		0,314	0,933	-	13,56 d
		0,244	0,766	-	3,779 y
		0,058	0,214	0,279	46,6 d
⁴¹ Ar	⁸⁹ Sr ⁶⁰ Co ¹³⁷ Cs/ ¹³⁷ Ba ⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	0,459	0,198	1,29	1,827 h
		0,583	0,463	-	50,5 d
		0,096	0,314	1,17/1,33	5,271 y
		0,173/0,425	0,514/1,176	0,662	30,0 y
		0,196/0,935	0,546/2,27	-	29,12 y

Beta s energiou menšou ako 0,01MeV a výťažkom menej ako 1% nie je uvedené

Referenčná odozva pri meraní iódu

- Referenčná odozva sa nesmie líšiť o viac ako 20% od hodnoty deklarovanej výrobcom.
- Chemická forma iódu musí zodpovedať tej, na ktorú bolo meradlo vyrobené. Môže sa použiť iód ¹³¹I vo forme molekulového iódu alebo v organickej forme ako ICH₃ (metyliodid) alebo HIO₃ (kyselina iodičná).
- Zámeny nuklidov sú možné kvôli malému polčasu referenčných zdrojov:
 - ¹³³Ba miesto ¹³¹I a ¹²⁹I miesto ¹²⁵I.

Referenčná odozva pri meraní trícia



- Referenčná odozva sa nesmie líšiť o viac ako 15% od hodnoty deklarovanej výrobcom.
- Na meranie referenčnej odozvy sa používa plyný referenčný materiál s obsahom trícia v chemickej forme na akú bolo meradlo vyrobené.
- Neistota stanovenia objemovej aktivity trícia nesmie presiahnuť 7%(k=2).

Kontinuálne monitorovanie aktivity v plyných výpustiach



- STN IEC 60 861:2006 Zariadenie na kontinuálne monitorovanie rádionuklidov emitujúcich žiarenie beta a gama vo vypúšťaných kvapalinách.
- Nahradzujúce normy: STN EN 60 861:2009-01 (35 6567) platí od 1.1.2009

Detektory na meranie aktivity v kvapalných výpustiach



- Môžu sa použiť detektory beta žiarenia, pričom treba zobrať do úvahy efektívnu plochu detektora, hrúbku, geometriu merania a závislosť účinnosti na energii žiarenia.
- Pri meraní gama žiarenia treba určiť energetickú závislosť účinnosti detektora a pri použití gamaspektrometrickej analýzy energetickú závislosť rozlíšenia detektora.
- Na zníženie vplyvu pozadia treba použiť tienenie alebo kompenzačné meranie iným detektorom.

Referenčná odozva pri meraní kvapalných výpustí

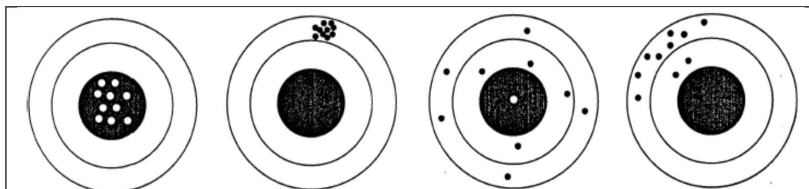


- Relatívna chyba merania nesmie prekročiť 15% .
- Na meranie referenčnej odozvy sa používa kvapalný referenčný materiál s obsahom nuklidu:
- Pre gama monitory – ^{133}Xe , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{60}Co
- Pre beta monitory – ako v tabuľke pre aerosóly.

Presnosť - precision, správnosť- accuracy

V SLOVENČINE SÚ ČASTO SYNONYMÁ: PRECISION, TRUENESS, ACCURACY

SPRÁVNOSŤ = PRESNOSŤ = PRAVDIVOSŤ = VERNOSŤ= PRECÍZNOSŤ



High precision	High precision	Low precision	Low precision
High accuracy	Low accuracy	High accuracy	Low accuracy

Vysoká presnosť	Nízka presnosť		
Vysoká zhodnosť	Vysoká zhodnosť	Nízka zhodnosť	Nízka zhodnosť
Vysoká správnosť	Nízka správnosť	Vysoká správnosť	Nízka správnosť

accuracy, trueness, precision

- accuracy – presnosť**

closeness of agreement between a **measured quantity value** and a **true quantity value** of a measurand

- trueness – zhodnosť, správnosť**

closeness of agreement between the average of an infinite number of replicate **measured quantity values** and a **reference quantity value**

- precision - precíznosť**

closeness of agreement between **indications** or **measured quantity values** obtained by replicate **measurements** on the same or similar objects under specified conditions