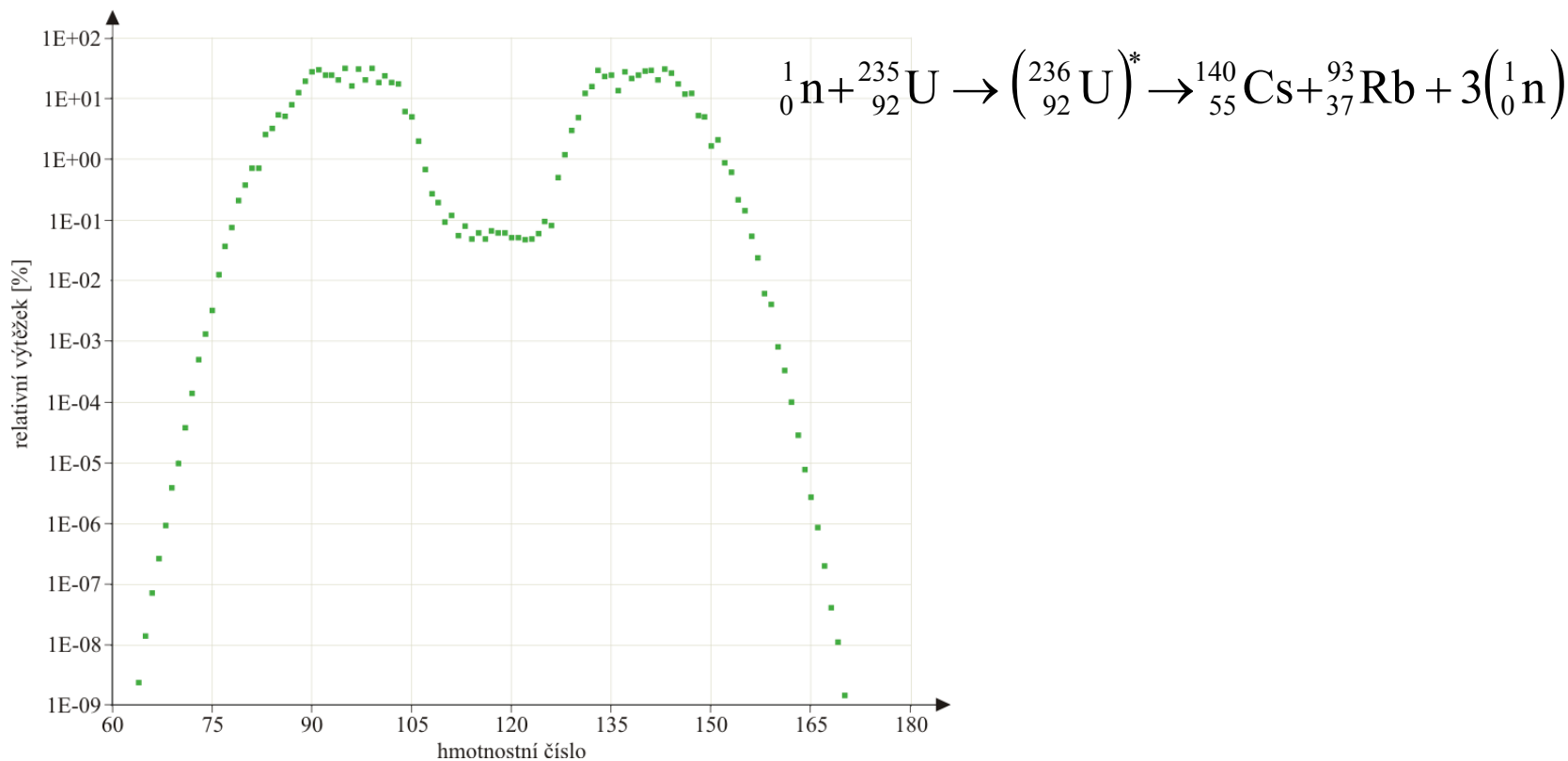


ZPOŽDĚNÉ NEUTRONY

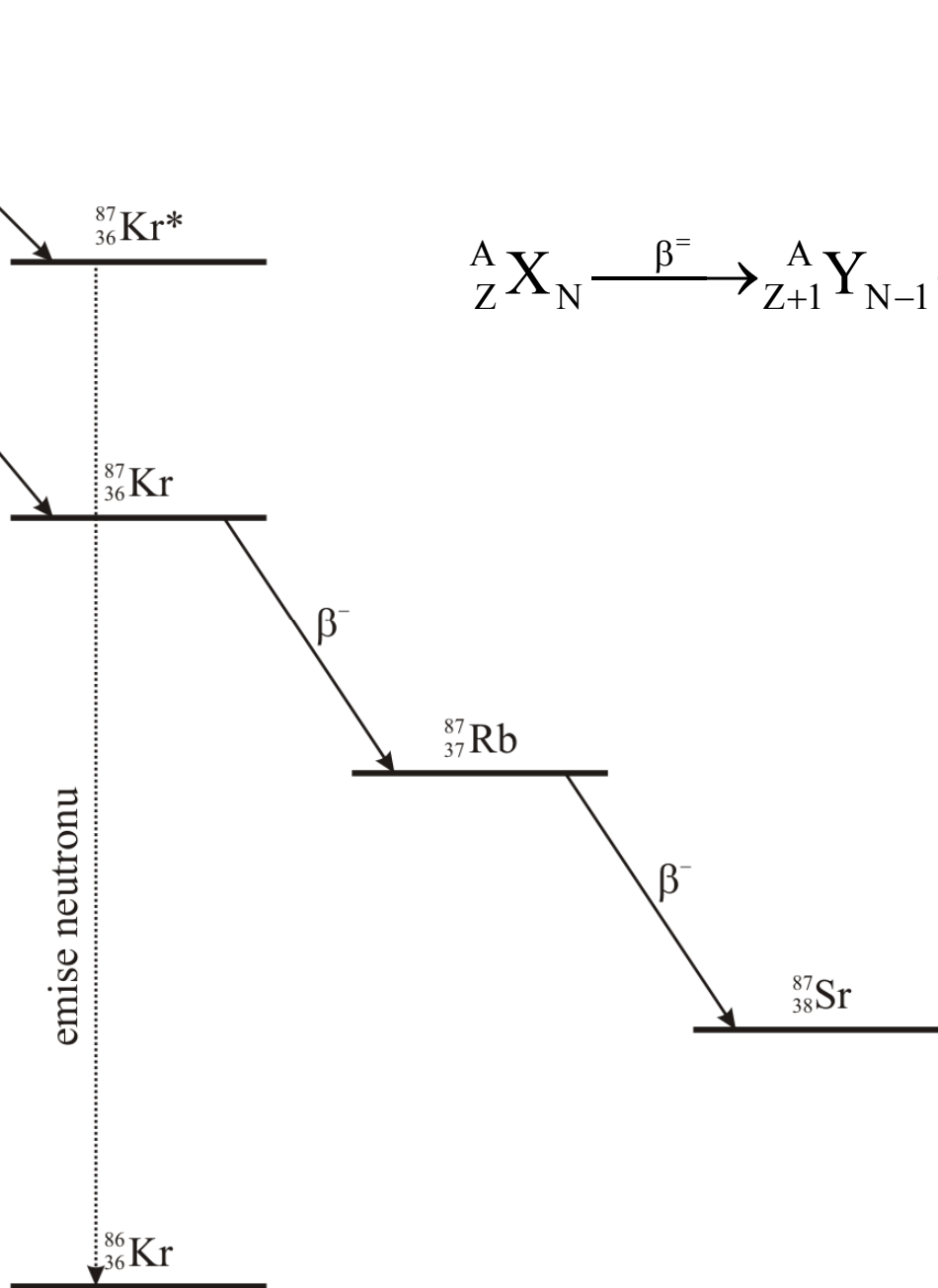
- Při štěpení vznikají okamžité neutrony a obvykle dva produkty štěpení.
- Okamžité neutrony – 99%, uvolňovány cca 10^{-14} s po štěpení, střední energie 2 MeV. Přibližně 2,43 okamžitých neutronů na jedno štěpení ^{235}U .
- Zpožděné neutrony – uvolňují se z RA produktů štěpení za různě dlouhou dobu po štěpení.
- Mají velký význam z pohledu provozu, řízení a dynamiky JZ.



VZNIK A VÝZNAM ZPOŽDĚNÝCH NEUTRONŮ

- Zpožděné neutrony vznikají při rozpadu radioaktivních produktů štěpení
- Střední doba života okamžitých neutronů : $\ell \cong (10^{-3} \div 10^{-5})s$
- Střední doba života zpožděných neutronů cca 0,1 s.
- Prodlužují střední dobu života jedné generace neutronů: $\bar{\ell} = \ell(1 - \beta) + \sum_{i=1}^6 \beta_i \tau_i$

$^{87}_{35}\text{Br}$ $T_{1/2}=55\text{ s}$



PARAMETRY ZPOŽDĚNÝCH NEUTRONŮ

$$T_{1/2} \quad \lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} \quad \beta = \frac{v_d}{v_{\text{tot}}}$$

$$v_{\text{tot}} = v_p + v_d$$

$$v_{\text{ft}}^5 = 2,42 \pm 0,1 \quad v_{\text{ff}}^5 = 2,63$$

$$v_{\text{ft}}^9 = 2,87 \pm 0,1 \quad v_{\text{ff}}^9 = 3,12$$

jádro	v_d (neutronů/100 štěpení)
^{233}U	$0,667 \pm 0,0029$
^{235}U	$1,621 \pm 0,05$
$^{238}\text{U}^*$	$4,39 \pm 0,10$
^{239}Pu	$0,628 \pm 0,038$
$^{240}\text{Pu}^*$	$0,95 \pm 0,08$
^{241}Pu	$1,52 \pm 0,11$
$^{242}\text{Pu}^*$	$2,21 \pm 0,26$

i	Prekursor	Střední energie [MeV]	T _{1/2} [s]			Podíl zpožděných neutronů [%]		
			²³⁵ U	²³⁹ Pu	²³³ U	²³⁵ U	²³⁹ Pu	²³³ U
1	⁸⁷ Br, ¹⁴² Cs	0,25	55,72	54,28	55,0	0,021	0,0072	0,0226
2	¹³⁷ I, ⁸⁸ Br	0,56	22,72	23,04	20,57	0,140	0,0626	0,0786
3	¹³⁸ I, ⁸⁹ Br, (^{93,94})Rb	0,43	6,22	5,60	5,00	0,126	0,0444	0,0658
4	¹³⁹ I, (^{93,94})Kr ¹⁴³ Xe, (^{90,92})Br	0,62	2,3	2,13	2,13	0,252	0,0685	0,0730
5	¹⁴⁰ I, ¹⁴⁵ Cs	0,42	0,61	0,618	0,615	0,074	0,018	0,0135
6	(Br, Rb, As ...)	-	0,23	0,257	0,277	0,027	0,0093	0,0087
Total						0,64	0,21	0,26

$$\beta_{\text{ef}} = \bar{\beta} \cdot I$$

$\bar{\beta}$ – průměrný podíl zpožděných neutronů

I – faktor významnosti

0,97 pro PWR

$$\frac{dn}{dt} = \frac{k_{\text{eff}}(t) - 1}{\ell} n(t) \quad \Delta k_{\text{ef}} = k_{\text{ef}} - 1$$

$$n(t) = n_0 \cdot e^{\frac{\Delta k_{\text{eff}} \cdot t}{\ell}} \quad \longrightarrow \quad P(t) = P_0 \cdot e^{\frac{\Delta k_{\text{eff}} \cdot t}{\ell}}$$

$$\frac{P(t)}{P_0} = e \quad \longrightarrow \quad \frac{P(t)}{P_0} = e = e^{\frac{\Delta k_{\text{eff}} \cdot T}{\ell}} \quad \longrightarrow \quad T = \frac{\ell}{\Delta k_{\text{eff}}}$$

k_{ef} se změní $1 \rightarrow 1,001$ ($\Delta k_{\text{ef}} = 0,001$ a $\rho \approx 0,1\%$) a $\ell = 9,97 \cdot 10^{-5} \text{s}$:

$$T = \frac{\ell}{\Delta k_{\text{eff}}} = \frac{9,97 \cdot 10^{-5}}{1 \cdot 10^{-3}} \approx 0,1 \text{ s} \quad \text{and} \quad P(1\text{s}) = P_0 \cdot e^{\frac{1\text{s}}{0,1\text{s}}} = P_0 \cdot e^{10} \cong 2 \cdot 10^4 \cdot P_0$$

$$\bar{\ell} = \ell + \sum_{i=1}^6 \beta_i \cdot \tau_i \quad \text{pro } ^{235}\text{U } 0,0942 \text{ s}$$

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{k_{\text{ef}} \cdot (1 - \beta) - 1}{\ell} \cdot n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot C_i(t)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \beta_i \cdot \frac{k_{\text{ef}}}{\ell} \cdot n(t) - \lambda_i \cdot C_i(t)$$

$$n(t) \approx n_0 \cdot e^{t/T}$$

$$T \approx \frac{\beta - \rho}{\rho \bar{\lambda}} \quad \text{Pro } \rho/\beta < 1$$

$$T \approx \frac{\ell}{k_{\text{ef}} (\rho - \beta)} \quad \text{Pro } \rho/\beta > 1$$

1) $\beta = 0,0064;$

$$\bar{\lambda} = 0,077 \text{ s}^{-1}$$

$$\ell = 9,97 \cdot 10^{-5} \text{ s} \quad \mathbf{T = 70.12 \text{ s}}$$

$$k_{\text{ef}} = 1,001;$$

$$\rho \approx 0,001;$$

2) $\beta = 0,0064;$

$$\bar{\lambda} = 0,077 \text{ s}^{-1}$$

$$\ell = 9,97 \cdot 10^{-5} \text{ s} \quad \mathbf{T = 0,152 \text{ s}}$$

$$k_{\text{ef}} = 1,0071,$$

$$\rho \approx 0,007;$$

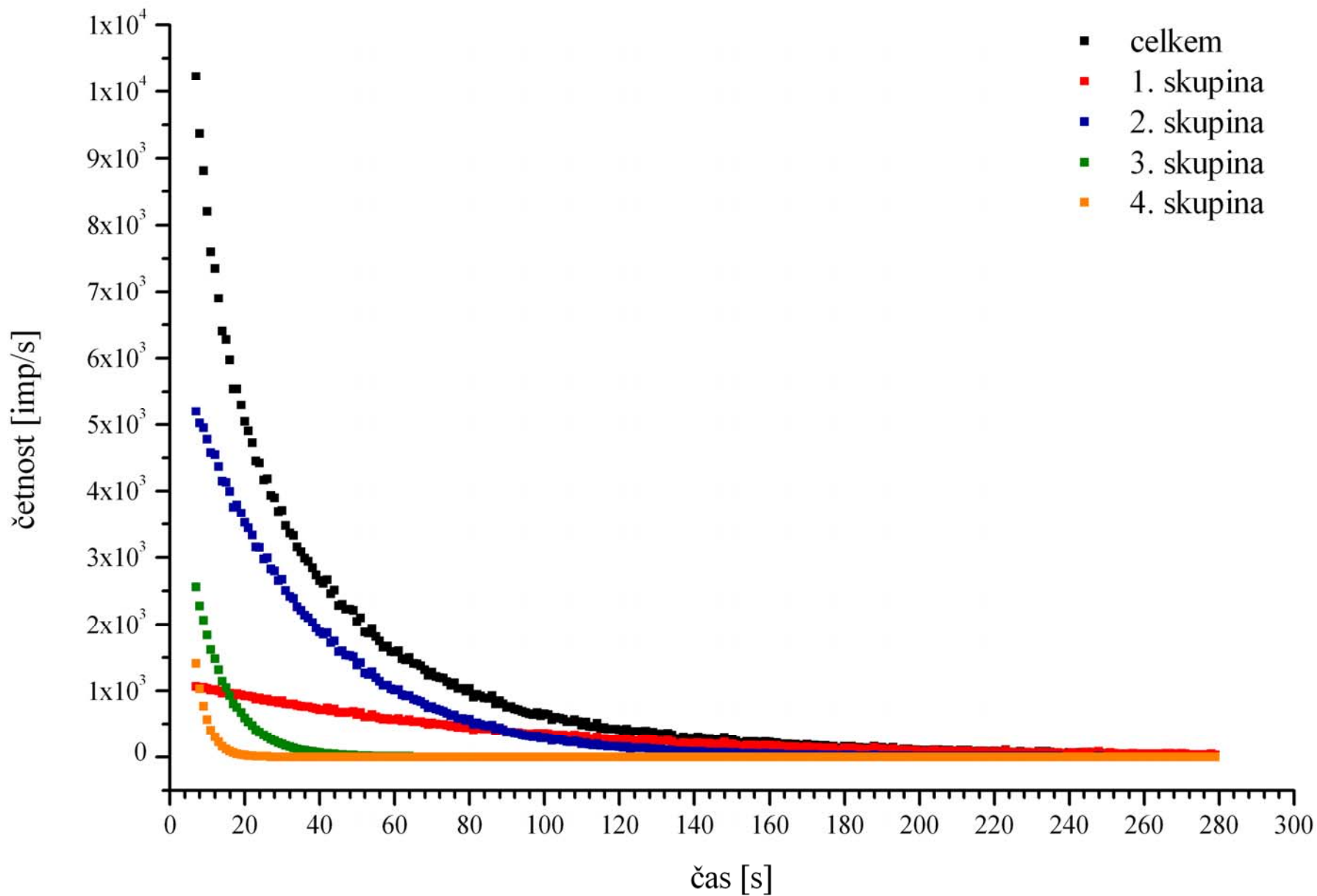
$$S_d(t) = n_f \cdot \sum_{i=1}^6 v_{di} \cdot \lambda_i \cdot e^{-\lambda_i \cdot t}$$

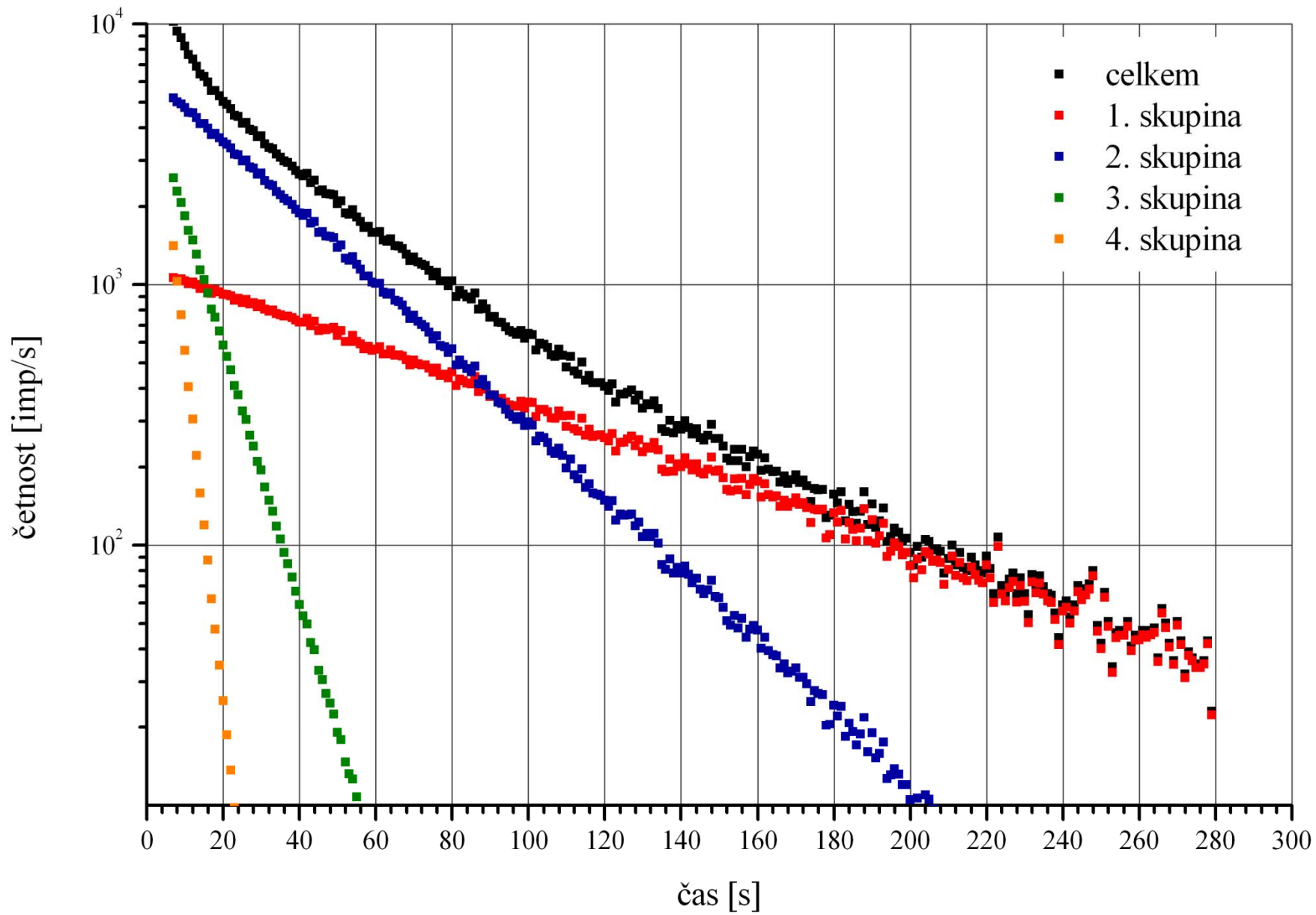
$$N_d(t) = \varepsilon \cdot n_f \cdot \sum_{i=1}^6 v_i \cdot \lambda_i \cdot \int_t^{t+\Delta t} e^{-\lambda_i \cdot t'} dt'$$

$$N_d(t) = \varepsilon \cdot n_f \cdot \sum_{i=1}^6 v_i \cdot \lambda_i \cdot \frac{1}{\lambda_i} \cdot (1 - e^{-\lambda_i \cdot \Delta t}) \cdot e^{-\lambda_i \cdot t}$$

$$N_d(t) = \sum_{i=1}^6 a_i \cdot e^{-\lambda_i \cdot t}$$

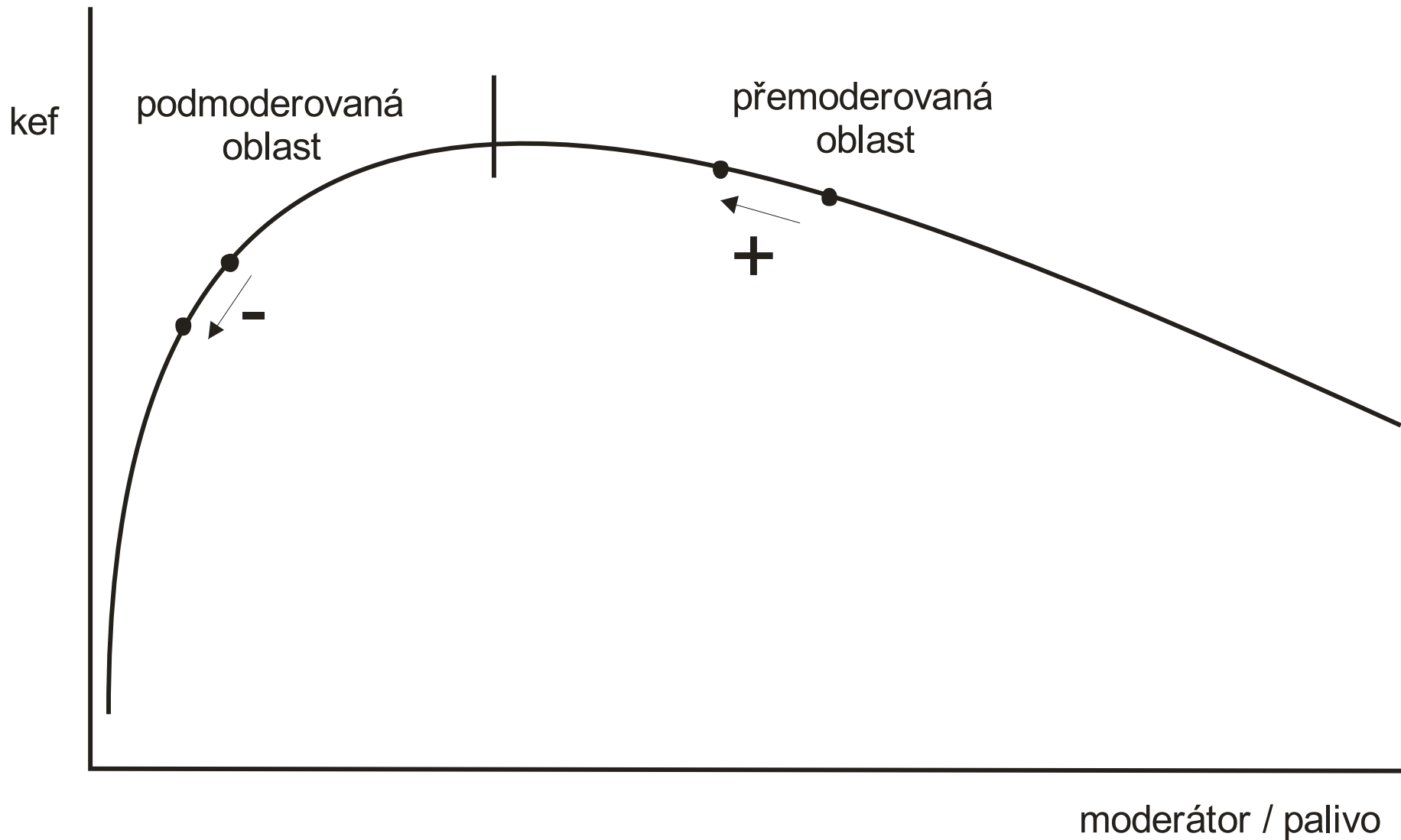
$$a_i = \varepsilon \cdot n_f \cdot v_i \cdot (1 - e^{-\lambda_i \cdot \Delta t})$$







$$a_y^x = \frac{\partial \rho^x}{\partial y}$$



$$k_{\infty} = \eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot f$$

