

Zpožděné neutrony

Name

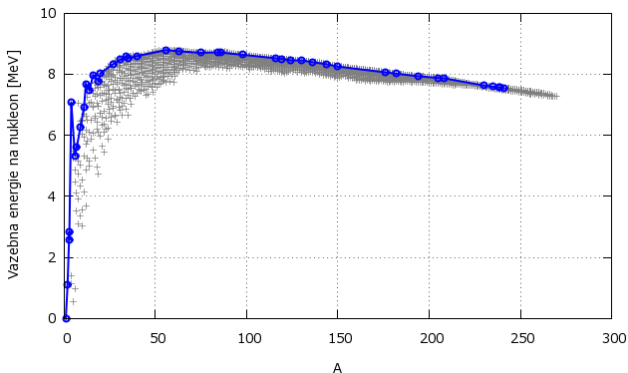
Katedra jaderných reaktorů

14. července 2020

1 Teoretický základ

Vazebná energie

- Energie se ve štěpném jaderném reaktoru uvolňuje štěpením těžkých jader (^{235}U , ^{239}Pu , atd.)
- Vazebná energie je energie, kterou je nutné dodat jádru k odseparování jednotlivých elementů

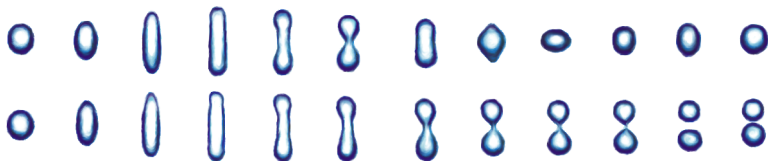


Proces štěpení jader

- Před absorpcí neutronu je v jádře rovnováha mezi všemi silami (elektrostatické, gravitační a jaderné)
- Absorpcí neutronu vzniká složené jádro, které je nestabilní a začíná vibrovat
- Jádro disponuje vnitřní energií, která je rovna vazebné energii neutronu a jeho kinetické energii
- Jádro může přebytek energie ztratit dvěma způsoby:
 - 1 Neutron je pohlcen složeným jádrem, které se do základního stavu vrací vyzářením γ záření \rightarrow vzniklé jádro je těžší, než původní
 - 2 Jádro se rozdělí na dvě lehčí komponenty, uvolní se velké množství energie a další neutrony

Kapkový model jádra atomu

- Jádro má strukturu podobnou velmi husté kapce tekutiny
- Hmotnost jádra s rostoucím hmotnostním číslem narůstá stejným tempem jako jeho rozměry → hustota je neměnná
- Pokud jádro získá dodatečnou energii, může kapka tekutiny nalézt nový rovnovážný stav, nebo se rozdělit na menší kapky



- Dostatečně velká energie → kmity kapaliny → deformace do tvaru tyčinky → elektrostatické odpuzování může překonat malou jadernou interakci a jádro se může rozdělit na 2 části

Minimální potřebná energie pro štěpení

- Základní podmínkou uskutečnění štěpení je vyšší hmotnost terčového jádra, než je součet hmotnostních odštěpků → splněno pro všechna jádra s hmotnostním číslem vyšším jak 100
- Součet kinetické a vazebné energie musí být vyšší, než aktivační energie štěpení
- Aktivační energie štěpení je nazývána kritickou energií - E_{krit}
- Kritická energie klesá pro velmi těžká jádra s rostoucím poměrem Z^2/A
- Speciální případ může nastat pokud vazebná energie interagujícího neutronu je vyšší než kritická energie, pak mohou štěpit i neutrony s téměř nulovou kinetickou energií

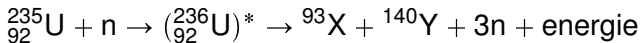
Kritická a vazebná energie vybraných nuklidů

Nuklid	E_{krit} (MeV)	Vazebná energie (MeV)
^{232}Th	5,9	*
^{233}Th	6,5	5,1
^{233}U	5,5	*
^{234}U	4,6	6,6
^{235}U	5,75	*
^{236}U	5,3	6,4
^{238}U	5,85	*
^{239}U	5,5	4,9
^{239}Pu	5,5	*
^{240}Pu	4,0	6,4

- * Vazebnou energii neuvažujeme, protože tyto nuklidy nemohou být vytvořeny absorpcí neutronu v jádře

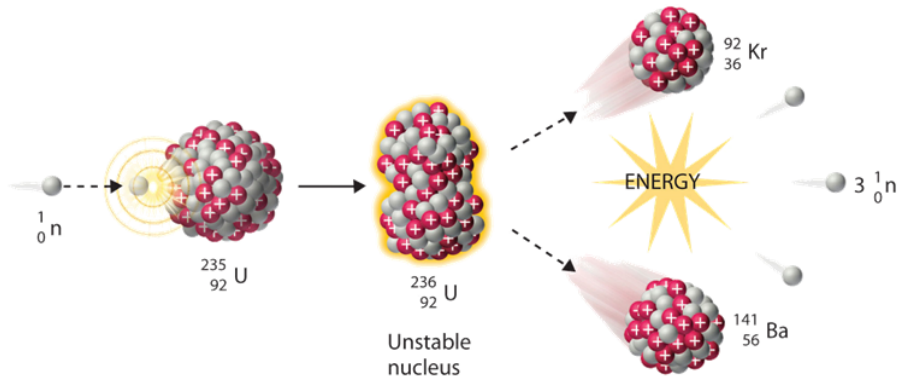
Štěpné a štěpitelné nuklidy, štěpení

- Nuklidy, které lze štěpit neutrony nízkých energií jsou štěpné (^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu a ^{241}Pu , izotopy s lichým hmotnostním číslem)
- Nuklidy, které pro štěpení potřebují dodatečnou energii se nazývají štěpitelné (^{238}U , ^{232}Th , izotopy se sudými hmotnostními čísly)
- Štěpitelné nuklidy lze štěpit neutrony s dostatečnou kinetickou energií
- Štěpení je možné zapsat ve formě:



- Výsledkem štěpení jaderného paliva jsou:
 - 1 2 středně těžké nuklidy (štěpné trosky)
 - 2 - 3 rychlé neutrony
 - 3 Doprovodné záření ve formě α , β i γ záření

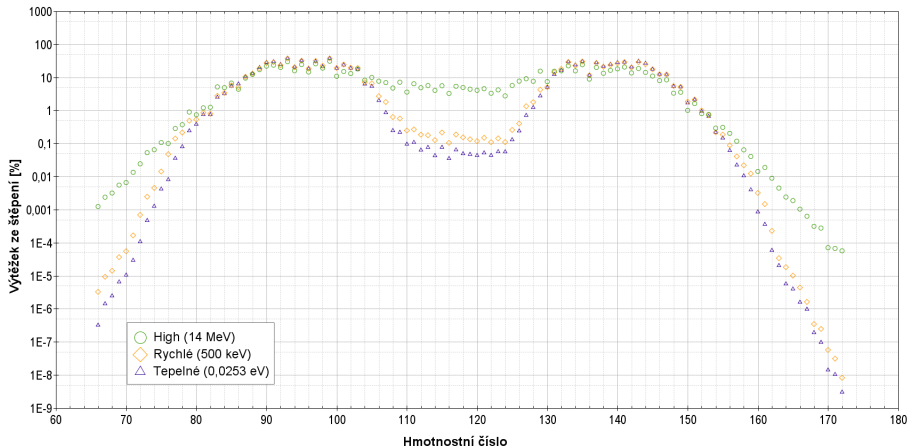
Štěpení jaderného paliva



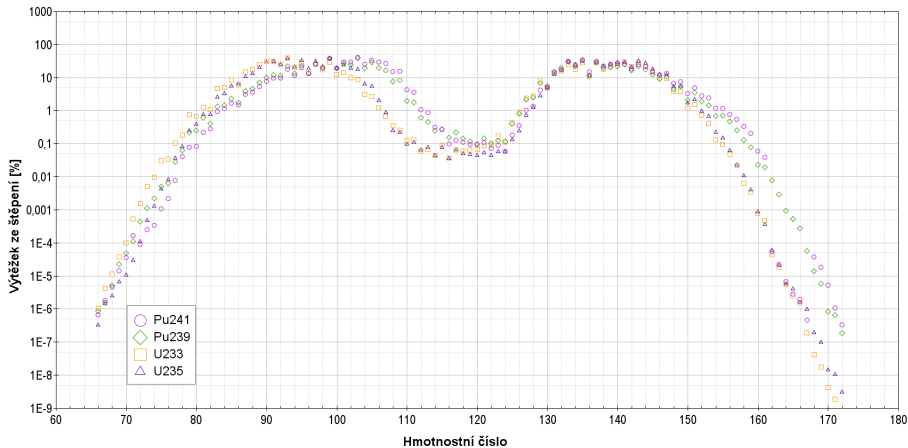
Štěpné produkty

- Souhrnný název pro štěpné trosky vzniklé štěpením i nuklidy vzniklé následným rozpadem
- Obvykle dva různě těžké štěpné produkty
- Široké možnosti vzniku rozdílných izotopů → přibližně 80 odlišných izotopů ze štěpení a cca 200 různých izotopů vzniklých následným rozpadem
- Štěpení je asymetrické
- Symetrické štěpení je vzácné
- 3 štěpné produkty vznikají pouze výjimečně

Výtěžek ze štěpení ^{235}U

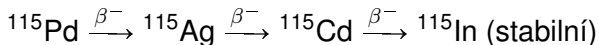


Výtěžek ze štěpení tepelnými neutrony



Stabilita štěpných produktů

- Štěpné produkty mají více neutronů, než odpovídá jejich stabilnímu stavu
- Mohou se rozpadat β^- rozpadem s doprovodným γ zářením
- Dceřinné produkty mohou být také nestabilní



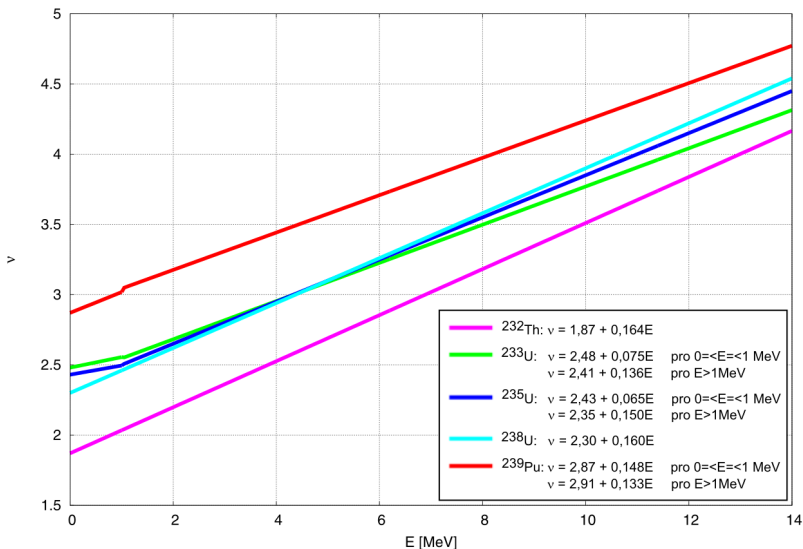
Neutrony ze štěpení

- Štěpení může probíhat různými způsoby
- Počet neutronů uvolněných ze štěpení závisí na konkrétním způsobu štěpení
- Každá z forem štěpení se vyskytuje s určitou pravděpodobností a je charakterizována počtem emitovaných neutronů
- Neutrony lze rozdělit na okamžité a zpožděné

Počet neutronů ze štěpení - ν

- Průměrný počet neutronů produkováný při jednom štěpení
- Hodnota závisí na štěpném materiálu a energii neutronu
- Při štěpení ^{235}U tepelnými neutrony je $\nu = 2,43$

Počet neutronů ze štěpení



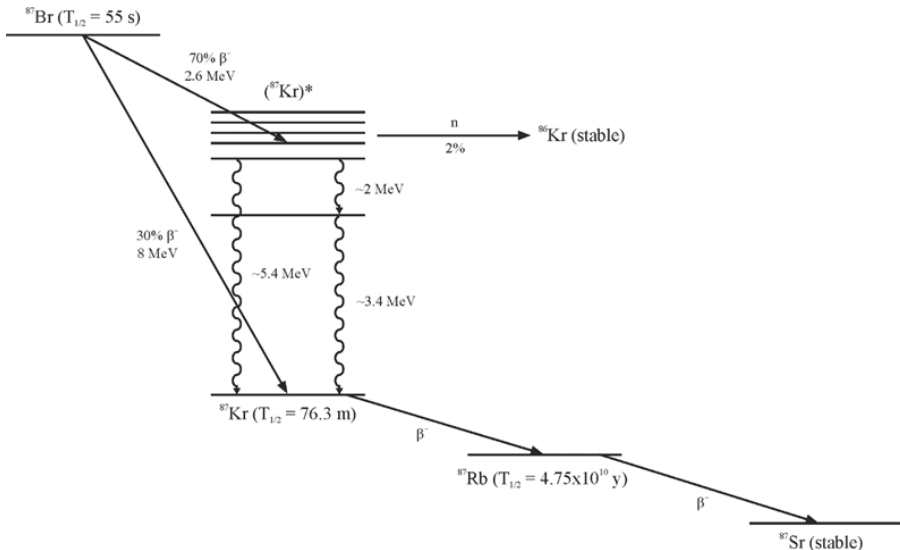
Okamžité neutrony

- Více jak 99 % všech neutronů ze štěpení
- Emitovány do 10^{-13} s po štěpení
- Množství okamžitých neutronů je přímo závislé na aktuálním výkonu aktivní zóny
- Střední energie okamžitých neutronů je přibližně 2 MeV
- Zpomalování a následná difúze prodlužuje dobu života okamžitých neutronů na $\sim 10^{-4}$ až 10^{-5} s
- Okamžité neutrony jsou emitovány s kinetickou energií od 0,1 MeV do 10 MeV

Zpožděné neutrony

- Produkty ze štěpení mají nadbytek neutronů → do stabilního stavu se dostávají β^- rozpadem, nebo emisí neutronu
- Produktům ze štěpení, ze kterých jsou emitovány neutrony se nazývají mateřská jádra (prekurzory)
- Neutrony, které jsou emitovány rozpadem mateřských jader se nazývají zpožděné neutrony
- Zpožděných neutronů je méně, než 1 %
- Střední energie zpožděných neutronů je přibližně 0,5 MeV
- Koncentrace zpožděných neutronů závisí na koncentraci mateřských jader v době jejich vzniku (výkonu reaktoru v době vzniku mateřského jádra)
- Má-li neutron minimální vazebnou energii, je emise neutronu pravděpodobnější
- Existuje přibližně 60 izotopů, které při svém rozpadu mohou emitovat neutrony, ty lze rozdělit do 6 skupin

Vznik zpožděných neutronů



Význam zpožděných neutronů

- Zpožděné neutrony prodlužují dobu života generace neutronů z přibližně 10^{-4} s na 0,1 s
- Zpožděné neutrony umožňují provoz jaderného reaktoru
- Demonstrace na příkladu reaktoru s vnějším neutronovým zdrojem neutronů:
 - Při uvažování $k_{\text{ef}} = 1,0001$ (10 pcm nadkritičnost) a zanedbání zpožděných neutronů bude relativní změna neutronů v 1. sekundě od počátečního stavu úměrná:

$$\frac{n(1)}{S} = \frac{10^{-5}}{1,0001 - 1} \left(e^{\frac{1,0001-1}{10^{-5}} \cdot 1} - 1 \right) \sim 2202,5 \quad (1)$$

- Při uvažování zpožděných neutronů a stejných podmínek:

$$\frac{n(1)}{S} = \frac{0,1}{1,0001 - 1} \left(e^{\frac{1,0001-1}{0,1} \cdot 1} - 1 \right) \sim 1,0005 \quad (2)$$

Charakteristiky okamžitých a zpožděných neutronů

Izotop	σ_f (b)		$\nu_{okamzite}$		$\nu_{zpozdene}$	
	0,0253 eV	2 MeV	0,0253 eV	2MeV	0,0253 eV	2 MeV
^{235}U	585	1,27	2,42	2,63	0,0162	0,0165
^{238}U	$2,7 \times 10^{-5}$	0,57	2,36	2,60	0,0478	0,0478
^{239}Pu	747	1,93	2,87	3,16	0,0065	0,0067
^{241}Pu	1012	1,76	2,92	3,21	0,0160	0,0160

- Při vyhořívání klesá podíl zpožděných neutronů a reaktorový systém se tak stává dynamičtější

Charakterizace zpožděných neutronů

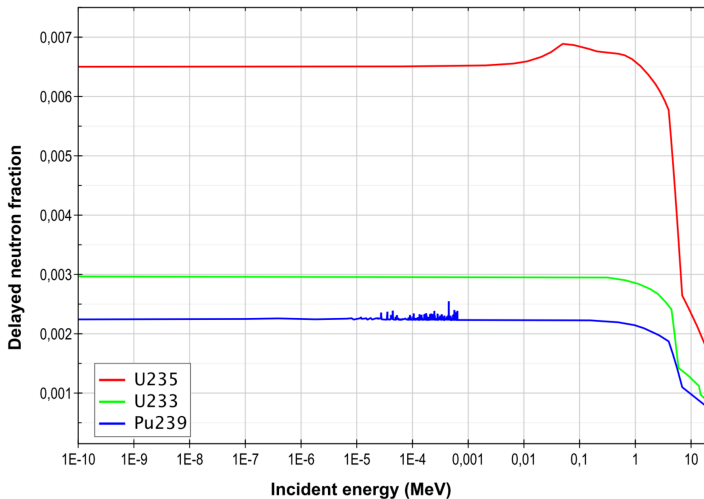
- Podíl i -té skupiny zpožděných neutronů - β_i
- Rozpadová konstanta i -té skupiny zpožděných neutronů - λ_i
- Podíl zpožděných neutronů - $\beta = \frac{\nu_d}{\nu_d + \nu_p}$
- Efektivní podíl zpožděných neutronů - β_{ef} - zohledňuje efekty závislé na energii zpožděných neutronů (mikroskopické účinné průřezy, pravděpodobnosti úniku rezonančnímu záchytu, pravděpodobnosti úniku neutronů)

Efektivní podíl zpožděných neutronů

$$\beta_{\text{ef}} = \beta \cdot I \quad (3)$$

- Vyšší únik neutronů ze systému (malé reaktory): $I > 1$
- Nízký únik neutronů ze systému (velké reaktory): $I < 1$

Podíl zpožděných neutronů v závislosti na energii neutronů

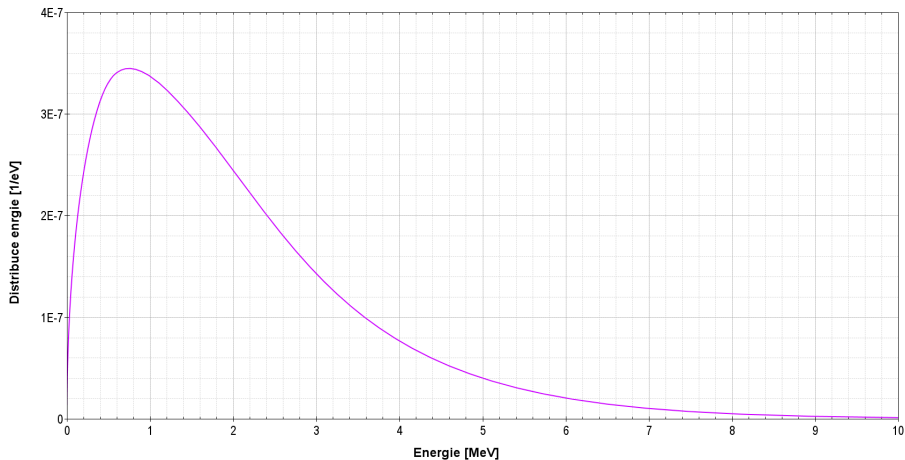


Parametry zpožděných neutronů pro ^{235}U

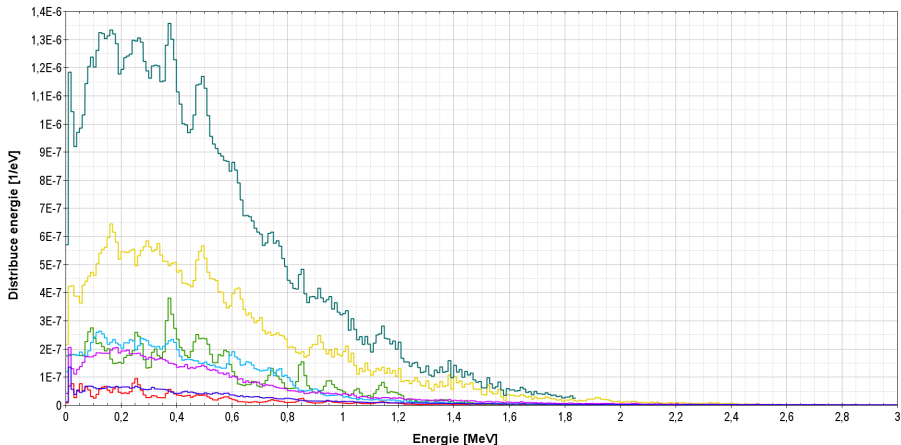
Skupina	Prekurzory	$T_{1/2}$ [s]*	Energie [keV]	Podíl β_i
1	^{87}Br , ^{142}Cs	55,72	250	0,000215
2	^{137}I , ^{88}Br	22,72	560	0,001424
3	^{138}I , ^{89}Br , ^{93}Rb , ^{94}Rb	6,22	405	0,001274
4	^{139}I , $^{(93,94)}\text{Kr}$, ^{143}Xe , $^{(90,92)}\text{Br}$	2,30	450	0,002568
5	^{140}I , ^{146}Cs	0,610	410	0,000748
6	Br, Rb, As, ...	0,230	—	0,000273
Celkový podíl zpožděných neutronů				0,0065

*Poločas rozpadu mateřského jádra

Spektrum energií okamžitých neutronů ze štěpení ^{235}U

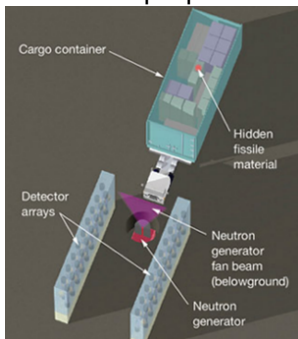


Spektrum energií skupin zpožděných neutronů ze štěpení ^{235}U



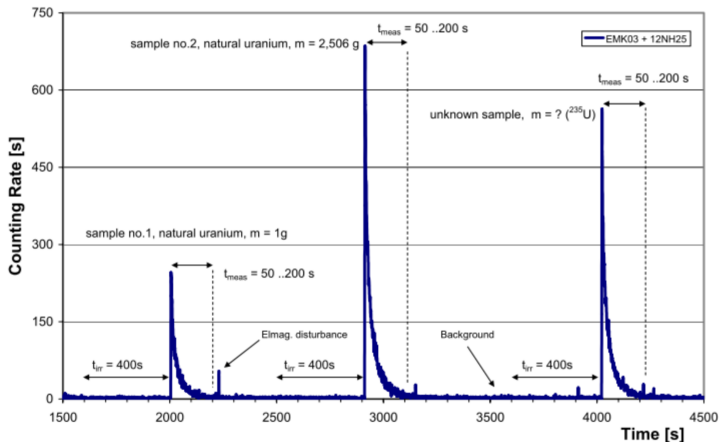
Využití zpožděných neutronů

- Ozařováním vzorů ve stejném místě reaktoru o stejném výkonu lze kalibračních vzorků vypočítat hmotnost neznámých vzorků
- Podle odlišných parametrů jednotlivých štěpných materiálů je lze mezi sebou rozlišit
- Zpožděné neutrony mohou být využity pro detekci štěpného materiálu v přepravních kontejnerech



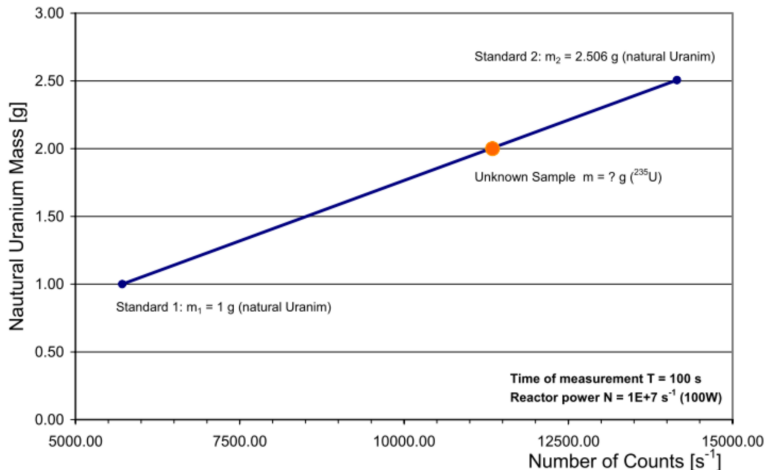
Stanovení hmotnosti/obohacení neznámého vzorku

- Ozařování a vyhodnocení 2 kalibračních vzorků
- Ozařování neznámého vzorku



Stanovení hmotnosti/obohacení neznámého vzorku

- Lineární interpolace mezi neznámými vzorky



Stanovení parametrů zpožděných neutronů (1)

- Emise zpožděných neutronů je závislá na aktivitě mateřských jader a jejich rozpadu:

$$\frac{dN_i}{dt} = Y_C \cdot \Sigma_f \cdot \Phi - \lambda_i \cdot N_i \quad (4)$$

- N_i je počet jader zpožděných neutronů i -té skupiny
- Y_C je kumulativní výtěžek mateřských jader ze štěpení
- Zanedbání záchytu neutronu na mateřských jádrech zpožděných neutronů
- Řešení diferenciální rovnice:

$$N_i(t) = \frac{Y_C \cdot \Sigma_f \cdot \Phi}{\lambda_i} \cdot (1 - e^{-\lambda_i \cdot t}) \quad (5)$$

Stanovení parametrů zpožděných neutronů (2)

- Pro získání zdrojového členu zpožděných neutronů je třeba vynásobit obě strany rovnice rozpadovou konstantou a pravděpodobností, že při rozpadu mateřského jádra dojde k emisi neutronu P_n

$$N_{\text{DN}}(t) = \sum_{i=1}^m P_n \cdot Y_C \cdot \Sigma_f \cdot \Phi \cdot (1 - e^{-\lambda_i \cdot t_{\text{irr}}}) \cdot e^{-\lambda_i \cdot t} \quad (6)$$

- Rozdělením neutronů do 6 skupin lze vztah přepsat do tvaru:

$$N_{\text{DN}}(t) = \sum_{i=1}^6 a_i \cdot (1 - e^{-\lambda_i \cdot t_{\text{irr}}}) \cdot e^{-\lambda_i \cdot t} \quad (7)$$

Stanovení parametrů zpožděných neutronů (3)

- Pro dostatečně dlouhý čas ozařování lze vztah přepsat do tvaru:

$$N_{\text{DN}}(t) = \sum_{i=1}^6 a_i \cdot e^{-\lambda_i \cdot t} \quad (8)$$

- Pro analýzu dat je třeba použít zpětnou nelineární regresi - komplikovaná metoda
- Je možné využít faktu, že: $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3 < \lambda_4 < \lambda_5 < \lambda_6$
- Vzhledem k výše uvedenému platí:
 $e^{-\lambda_1 \cdot t} \gg e^{-\lambda_2 \cdot t} \gg e^{-\lambda_3 \cdot t} \gg e^{-\lambda_4 \cdot t} \gg e^{-\lambda_5 \cdot t} \gg e^{-\lambda_6 \cdot t}$
- Je možné hledat parametry pouze 1 skupiny (předchozí skupiny se rozpadnou)
- Odečtením předchozí skupiny od všech skupin získat nové výchozí podmínky pro stanovení parametrů další skupiny zpožděných neutronů

Stanovení parametrů zpožděných neutronů (3)

