

# Využití zpožděných neutronů ke stanovení množství štěpného materiálu

J. Apjár\*, K. Rosická\*\*

Gymnázium ALTIS, Praha 10 \*, Gymnázium Jiřího Ortena Kutná Hora\*\*  
jiri.apik@seznam.cz\*, kacka.rosicka@gmail.com\*\*

## Abstrakt

Během projektu bylo měřeno obohacení a hmotnost vzorků pomocí metody zpožděných neutronů, která se využívá k nedestruktivní analýze vzorku. Měření bylo provedeno na školním reaktoru VR-1 s pomocí softwaru pro záznam aktivity naměřené pomocí detektorů. Celkové výsledky jsou vysoce přesné vzhledem k podmínkám měření. Nepřesnosti měření byly způsobeny mrtvou dobou detektoru, statistickou chybou měření, odchylkou zadaných údajů a dalších faktorů, které jsme nebyli schopni ovlivnit. Pro lepší přesnost v případě dalšího měření by bylo vhodnější vystavovat vzorky aktivní zóně po delší dobu a zároveň měřit aktivitu vzorku v delším časovém úseku.

## 1 Úvod

Cílem měření bylo zjistit množství štěpného materiálu za pomoci zpožděných neutronů. Tato metoda se využívá k analýze množství  $^{235}\text{U}$  ve vzorcích bez jejich poničení, čili ji lze použít i u historicky cenných vzorků. K měření byl k dispozici školní reaktor VR-1 a několik vzorků uranu s různou mírou obohacení a různou hmotností. Principem experimentu bylo, že nejprve byl pomocí referenčních vzorků zjištěn vztah aktivity, hmotnosti a obohacení a u ostatních vzorků byl vždy známý pouze jeden z údajů (hmotnost, nebo míra obohacení) a druhý údaj byl neznámý.

## 2 Teorie

V jaderném reaktoru probíhá štěpná jaderná reakce. Palivem je zde uran, který se skládá ze dvou izotopů, a to většina  $^{238}\text{U}$  a menší procento  $^{235}\text{U}$ . Reakce probíhá tak, že pomalé neutrony interagují s jádrem  $^{235}\text{U}$ , které rozštěpí na dva lehčí prvky a zároveň uvolní dva nebo tři rychlé takzvané *okamžité* neutrony. Vzniklé produkty rozpadu jsou obvykle také radioaktivní a rozpadají se s poločasem rozpadu mezi desetinami sekund a jednotkami minut. Některé z těchto rozpadů produkují takzvané *zpožděné* neutrony, které vylétávají ze vzorku ještě nějakou dobu pro vyjmutí z reaktoru, a proto jsme je mohli využít k měření. Vzhledem k tomu, že množství vzniklých produktů, které produkují zpožděné neutrony, je závislé na počátečním množství  $^{235}\text{U}$ , je množství vylétávajících zpožděných neutronů závislé na hmotnosti vzorku a na jeho obohacení.

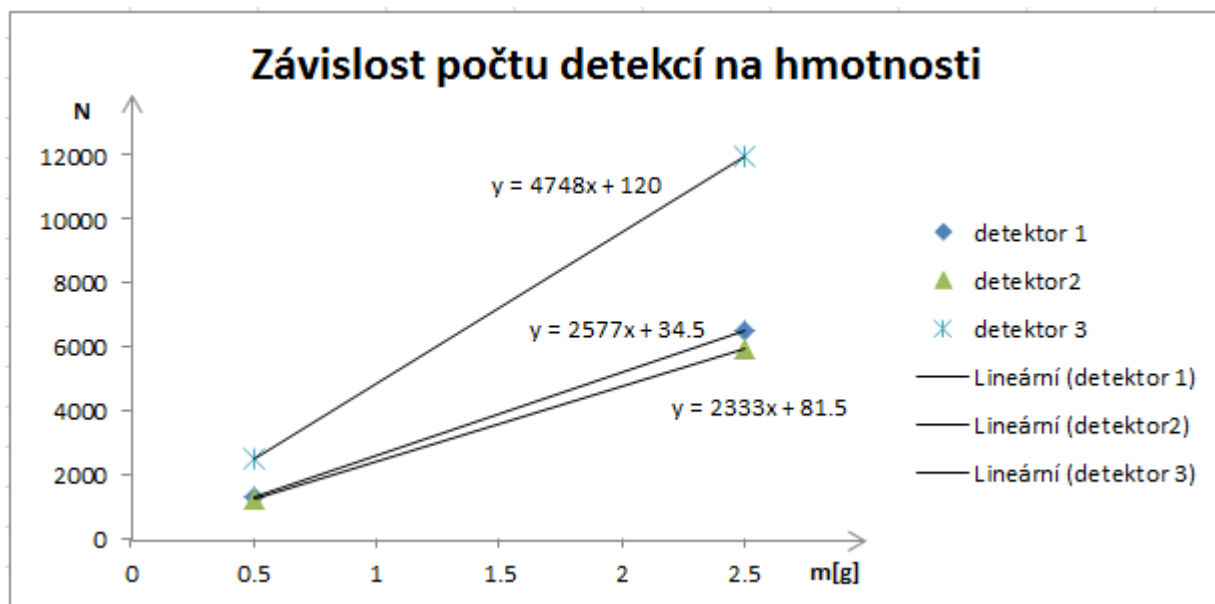
$$K \sim mp$$

detektor 1			$m_1$
m	0.5	2.5	1.67
K	1323	6477	4346
detektor 2			
m	0.5	2.5	1.78
K	1248	5914	4233
detektor 3			
m	0.5	2.5	1.88
K	2494	11990	9031

Tabulka 1: Výsledky měření aktivity pro různé hmotnosti přírodního uranu

### 3 Měření

Nejdříve byly s pomocí personálu školního reaktoru VR-1 ozářeny první dva vzorků přírodního uranu různých hmotností aby byla změřena jejich aktivita. Ozařování probíhalo vždy po dobu 400 s a za konstantního výkonu jaderného reaktoru. Aktivita byla měřena pomocí tří detektorů, které fungovaly na principu plynového detektoru, který obsahuje elektrody oddělené plynem, který se průletem radioaktivní částice ionizuje a vytváří tak vodivé spojení katody a anody. Detektor tedy nedokáže rozlišit druh částic, pouze jejich energii a tedy nedokáže přesně odlišit neutrony od jiných typů záření. To bylo kompenzováno použitím tří detektorů s minimální energií na zaznamenání impulsu. Měření dopadlých neutronů bylo prováděno vždy po dobu 100 s (viz tabulka 1). Vzhledem k tomu, že aktivita vzorků je přímo úměrná jejich hmotnosti (při stejném obohacení všech vzorků), byla naměřená data proložena přímkou a na základě toho byl sestaven předpis lineární funkce pro každý z detektorů (viz graf 1). Následně byl ozářen i 3. vzorek přírodního uranu, tentokrát však s neznámou hmotností. Vzhledem k tomu, že všechny 3 vzorky



Obrázek 1: Graf závislosti počtu detekcí na hmotnosti pro přírodní uran (obohacení 0,7%)

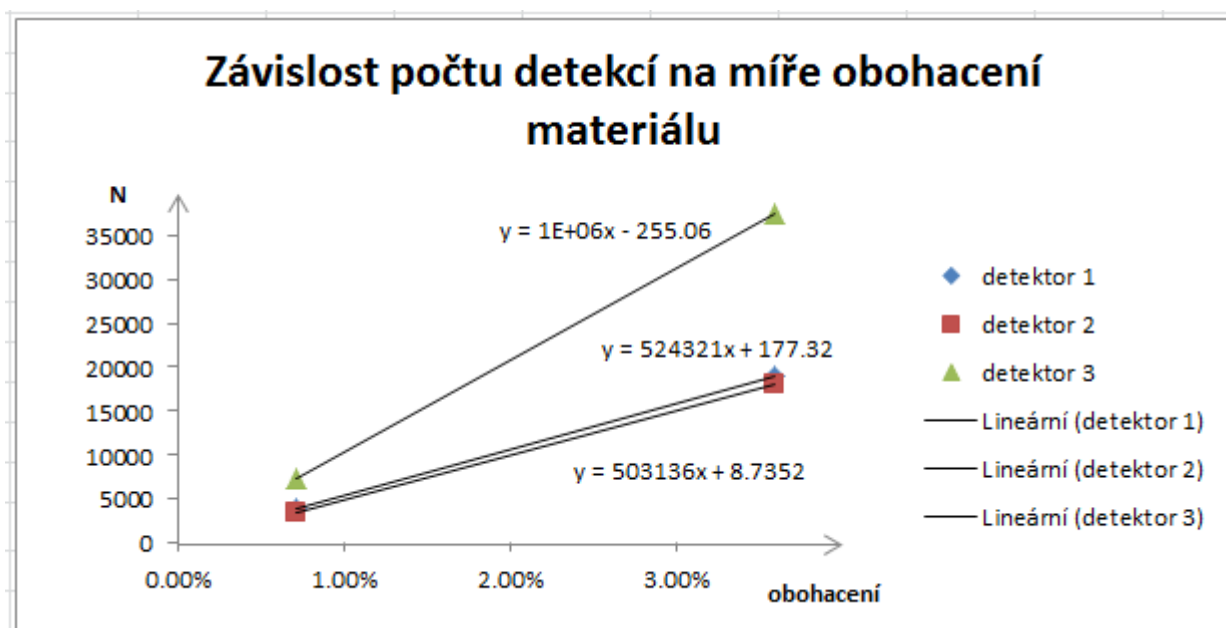
byly v aktivní zóně reaktoru po stejnou dobu a naměřené hodnoty byly vždy za stejný časový úsek, mohli jsme na základě předpisu funkce určit neznámou hmotnost u třetího

		detektor 1		$p_1$	$p_2$
p		0.71%	3.58%	1.66%	4.58%
K		3900	18948	8882	24190
detektor 2					
p		0.71%	3.58%	1.67%	4.50%
K		3581	18021	8410	22630
detektor 3					
p		0.71%	3.58%	1.68%	4.59%
K		7242	37547	16535	45679

Tabulka 2: Výsledky měření aktivity pro obohacení vzorků o hmotnosti 1,5 g

vzorku.

Následně jsme nechali ozářit vzorek uranu se známou mírou obohacení 3,58% a se známou hmotností 1,5 g. Změřili jsme jeho aktivitu a na základě výsledků předchozího měření tří vzorků přírodního uranu jsme zjistili teoretickou aktivitu vzorku přírodního uranu o hmotnosti 1,5 g (tabulka 2). Na základě tohoto výsledku jsme opět proložili hodnoty přímkou a určili předpisy funkcí pro jednotlivé detektory (viz graf 2). Následně jsme nechali ozářit zbývající dva vzorky o hmotnosti 1,5 g uranu s neznámou mírou obohacení. Jejich aktivitu jsme dosadili do známého předpisu funkce a na základě toho zjistili míru obohacení obou vzorků. Jako vedlejší produkt měření byla míra zjištěna



Obrázek 2: Graf závislosti počtu detekcí na obohacení vzorku o hmotnosti 1,5 g

hodnota pozadí rozdílná u každého detektoru. Podle grafů lze vidět, že detektor č. 3 byl nejvíce citlivý, zatímco detektor č. 1 byl citlivý nejméně (resp. míra diskriminace gamma záření byla u detektoru č. 1 nejvyšší, u detektoru č. 3 nejnižší).

Výpočet neznámé hmotnosti a neznámého obohacení byl proveden zvlášť pro každý detektor a výsledek byl zpočítán jako aritmetický průměr těchto hodnot. Výsledná hmotnost neznámého vzorku vyšla  $m_1 = (1,78 \pm 0,06\text{g})$  a výsledná obohacení  $p_1 = (1,67 \pm 0,01)\%$  a  $p_2 = (4,56 \pm 0,03)\%$ . Porovnání těchto hodnot s hodnotami uvedenými výrobcem vzorků

Měřená veličina	Naměřená hodnota	Udávaná hodnota
$m_1$	$(1,78 \pm 0,06)$ g	1,7 g
$p_1$	$(1,67 \pm 0,01)$ %	1,32 %
$p_2$	$(4,56 \pm 0,03)$ %	4,42 %

Tabulka 3: Porovnání naměřených hodnot s udávanými parametry

je v tabulce 3.

Měření touto metodou byla přesná. Výsledky se nevešly do odhadů chyb, které jsme vypočítali jako chybu aritmetického průměru, protože nebylo možné kvantifikovat chyby způsobené měřicí aparaturou. Tyto chyby byly zejména nastavení detektorů na diskriminaci gamma záření podle energie, nepřesné umístění vzorku mezi detektory, mrtvá doba detektoru nebo odchylka v zadaných vstupních údajích. Další nepřesnosti pocházejí z radioaktivního pozadí, které se v průběhu měření neustále mění a také ze samotné pravděpodobnostní povahy zkoumaného jevu.

## 4 Shrnutí

Pomocí měření zpóźděných neutronů byla určena hmotnost a obohacení neznámého vzorku s relativně velkou přesností. Výsledky jsou poměrně přesné a jejich porovnání s tabelovanými hodnotami je uvedeno v tabulce 3.

## Poděkování

Chtěli bychom poděkovat našemu vedoucímu Ing. Ondřeji Novákovi za vedení projektu a cenné rady, personálu jaderného reaktoru VR-1 za umožnění přístupu a celému organizačnímu týmu Týdne vědy na Jaderce.