

# Ověření zákonitostí radioaktivních přeměn

Jaromír Karmazín, Gymnázium Velké Meziříčí, blue.beret@seznam.cz

Aneta Nová, Gymnázium Šternberk, novaaneta@centrum.cz

## Abstrakt:

Naším cílem bylo ověřit zákonitosti radioaktivních přeměn izotopů stříbra a zákonitosti přeměn radionuklidů v genetické závislosti pro pár  $^{137}\text{Cs}$  a  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  ve formě radionuklidového generátoru. Využili jsme měřicích přístrojů radiochemické laboratoře, a sice studňového NaI(Tl) detektoru a detektoru s plastickým scintilátorem, připojených k jednonábovým analyzátorům. Výsledkem byly rozpadové křivky, ze kterých jsme následně určili poločasy rozpadu jednotlivých radionuklidů.

## 1 Úvod

Jádra nuklidů prvků mohou podléhat samovolné radioaktivní přeměně, tyto nestabilní nuklidy nazýváme radionuklidy nebo radioizotopy, kdy izotop je označen pro nuklid v rámci souboru nuklidů jednoho prvku. Zmíněná samovolná přeměna jader se řídí zákony radioaktivní přeměny a charakteristickou veličinou pro daný nuklid je poločas rozpadu.

Pro počet částic  $N$  v daném čase platí základní kinetický zákon

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

kde  $\lambda$  je rozpadová konstanta látky. Protože ve většině případů není možné měřit počet částic radioaktivní látky přímo, měří se aktivita látky  $A$ , která je přímo úměrná množství látky a platí pro ni vztah

$$A = \lambda N.$$

Odtud také plyne

$$A = A_0 e^{-\lambda t}.$$

Mezi rozpadovou konstantou a poločasem rozpadu  $T$  platí vztah

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$

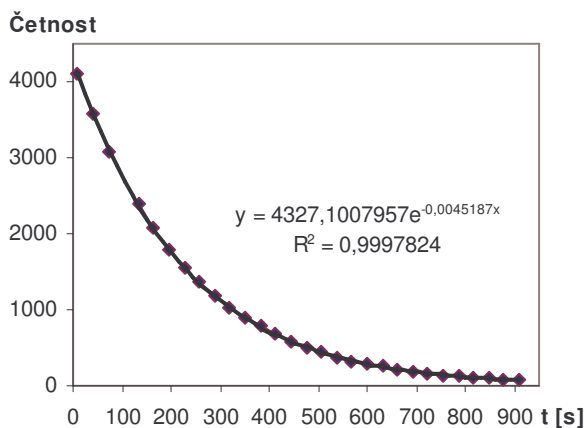
Radionuklidy lze rozdělit na přirozené, které se vyskytují v přírodě například spolu se svými stabilními izotopy, a umělé, připravované jadernými reakcemi. Jednou z vhodných jaderných reakcí je reakce  $(n,\gamma)$ , kdy je vhodný stabilní nuklid ozářen pomalými neutrony a jako produkt reakce vznikne radioizotop s hmotnostním číslem o jednotku vyšším.

Pro práci s aktivními roztoky radionuklidů, zvláště těch s kratšími poločasy, které není možné skladovat, se s výhodou používají radionuklidové generátory. Jedná se o systém tvořený párem geneticky svázaných radionuklidů, z nichž požadovaný radionuklid je dceřiný nuklid s poločasem přeměny významně kratším než nuklid mateřský. Tato zařízení nacházejí uplatnění např. ve zdravotnictví, kde lze použít radioaktivní látku ke sledování krevního oběhu, hledání nádorů apod. Právě zde je krátký poločas rozpadu důležitým měřítkem, neboť umožňuje snížit dávku záření, kterému je pacient vystaven.

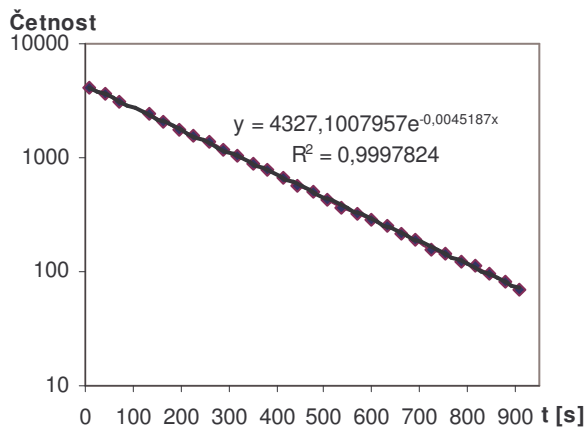
## 2 Měření poločasu rozpadu $^{137m}\text{Ba}$

Nejprve jsme ověřovali vztah pro radioaktivní přeměnu jediného izotopu.

Z radionuklidového generátoru jsme izolovali izotop barya  $^{137m}\text{Ba}$ , který se přeměňuje vyzářením fotonu gama na stabilní izotop  $^{137}\text{Ba}$ . Toto záření jsme v pravidelných časových intervalech měřili, čímž jsme získali rozpadovou křivku. Provedli jsme dvě série měření, v grafech 1 a 2 uvádíme výsledky první z nich.



Graf 2: Rozpad  $^{137m}\text{Ba}$  (lineární měřítko)



Graf 1: Rozpad  $^{137m}\text{Ba}$  (logaritmické měřítko)

Podle vztahu uvedeného v úvodu má být závislost aktivity látky na čase exponenciální. Naši křivku jsme tedy proložili exponenciální funkcí a ověřili si, že tato závislost platí. Nejlépe to lze vidět v logaritmickém měřítku (graf 2), kde se exponenciální funkce zobrazuje jako přímka.

Ze vzorce proložené exponenciální funkce vyčteme hodnotu  $\lambda = 0,0045187$ , z níž snadno určíme poločas rozpadu

$$T = \frac{\ln 2}{0,0045187} = 153,4 \text{ s.}$$

Tabulková hodnota pro tento nuklid je 153,1 s [1], naše odchylka tedy byla 0,2 %. Pro hodnoty druhého měření vyšel poločas rozpadu 155,5 s, tedy s odchylkou 1,6 %.

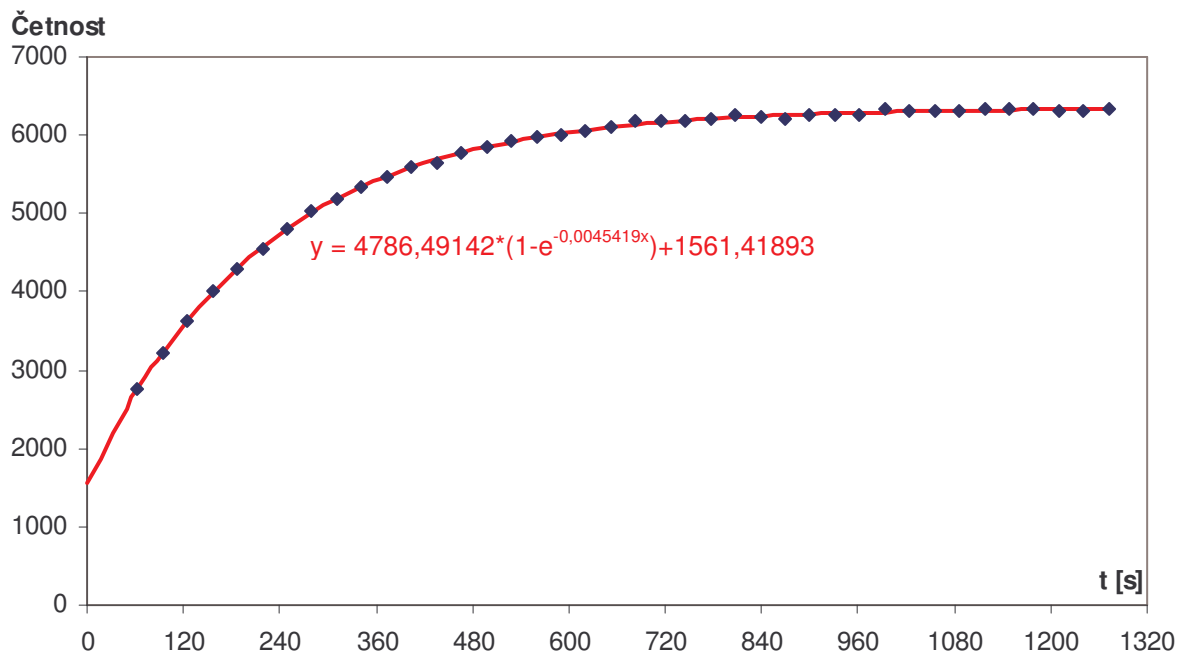
## 3 Radionuklidový generátor $^{137}\text{Cs} - ^{137m}\text{Ba}$

Baryum  $^{137m}\text{Ba}$ , které jsme použili v první části pokusu, vzniklo v radionuklidovém generátoru, ve kterém je  $^{137}\text{Cs}$  vázáno v matrici KNiFC-PAN (aktivní složkou je hexakyanoželeznatan draselný-nikelnatý). Cesium jako alkalický kov snadno vytěsňuje draslík ze sloučeniny. Baryum tuto vlastnost nemá, a proto přechází do roztoku, odkud jej lze eluovat (vymýt) např. fyziologickým roztokem. Vzhledem k tomu, že  $^{137}\text{Cs}$  má poločas rozpadu (cca 30 let) mnohem delší než dceřiný nuklid (153 s), po čase vzniká v soustavě těchto dvou nuklidů radioaktivní rovnováha, kdy je aktivita mateřského i dceřiného nuklidu vyrovnaná, a množství dceřiného nuklidu  $^{137m}\text{Ba}$  tak zůstává stejné. Vzhledem k poločasu dceřiného  $^{137m}\text{Ba}$  stačí k ustavení rovnovážného stavu krátká doba, obvykle 10 poločasů rozpadu, zde tedy přibližně 25 minut. V praxi stačí 4–5 poločasů k tomu, aby mohl být odebrán účinný vzorek např. k aplikaci pacientovi.

Průběh nárůstu aktivity dceřiného nuklidu popisuje rovnice

$$A = A_{\infty}(1 - e^{-\lambda t}) + A_0,$$

kde  $A_0$  je aktivita dceřiného nuklidu v okamžiku ukončení eluce a  $A_\infty$  je maximální nárůst aktivity (do dosažení rovnovážného stavu). Aktivitu jsme začali měřit krátce po důkladném promytí generátoru (53,2 sekund od ukončení eluce).



Graf 3: Nárůst aktivity  $^{137m}\text{Ba}$  v generátoru

Naměřenými body jsme proložili zmíněnou funkci s následujícími parametry:

- $A_\infty = 4786,5$  imp/s
- $A_0 = 1561,4$  imp/s
- $\lambda = 0,0045419$

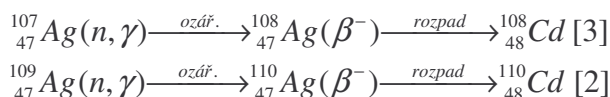
Nyní jsme schopni určit účinnost eluce z hodnot počáteční aktivity (nevymytý radionuklid) a konečné aktivity:

$$\eta = 1 - \frac{A_0}{A_\infty + A_0} = 75,4 \%$$

Tento poměr udává množství barya, které jsme dokázali z generátoru eluovat. Účinnost eluce závisí na rychlosti promytí kolonky generátoru, na objemu prošlého roztoku a dalších parametrech.

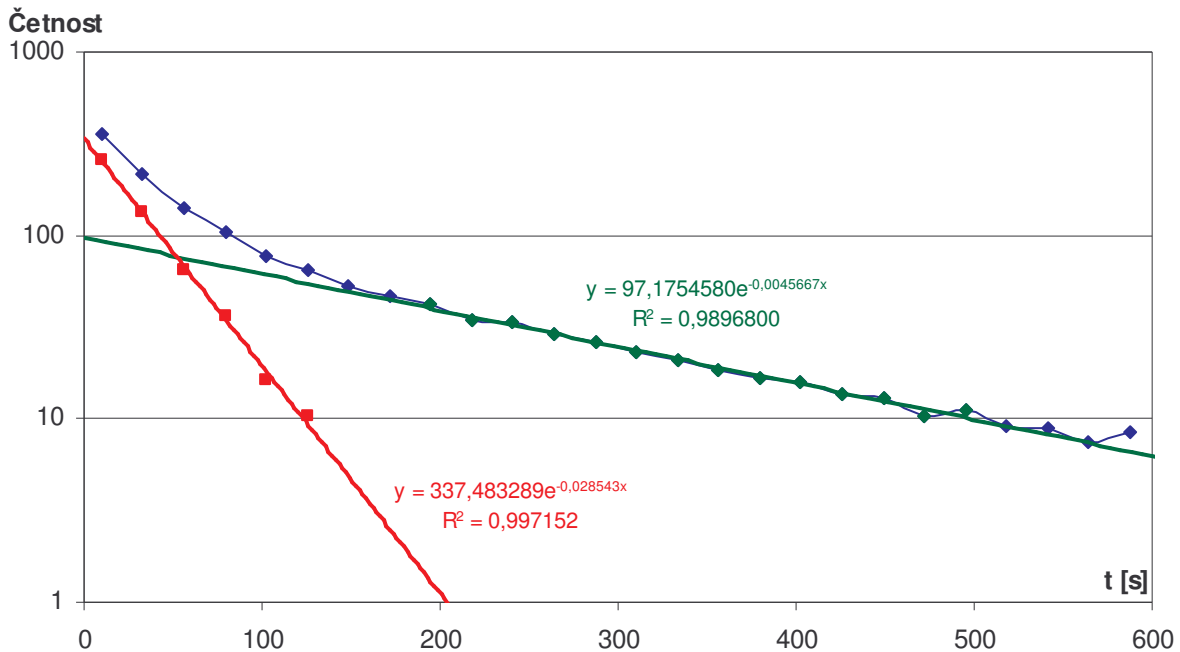
## 4 Analýza složené rozpadové křivky

K dalšímu pokusu jsme použili stříbrný plíšek ozářený pomalými neutrony z neutronového děla. Při ozáření přírodního stříbra, jež se skládá ze dvou stabilních izotopů, vniknou dva nové, nestabilní izotopy. Oba tyto izotopy podléhají radioaktivnímu rozpadu  $\beta^-$  a přeměňují se na kadmium:



Jelikož jsou přítomny dva zářiče, bude výsledná aktivita rovna součtu aktivit každého izotopu. Závislost aktivity na čase se potom skládá ze dvou exponenciálních funkcí, které musíme oddělit, abychom mohli určit poločasy rozpadu.

Pro lepší vyhodnocení jsme provedli 3 série měření, z nichž každá proběhla za stejných podmínek, a naměřené hodnoty jsme v jednotlivých časech sečetli.



**Graf 4: Rozpadová křivka stříbra**

Přítomnost více exponenciálních funkcí má za následek to, že rozpadová křivka v logaritmickeém měřítku netvoří přímku. Můžeme ji rozdělit podle času na dvě části: v pozdějších časech (b), kdy už se izotop s kratším poločasem z větší části rozpadl, je v systému většinou složkou déle žijící izotop a rozpadovou křivkou lze v semilogaritmickeém měřítku proložit přímkou; v dřívějších časech (a) se více projevuje izotop s kratší přeměnou, což má za následek zakřivení grafu. Extrapolací přímky (b) a jejím odečtením od hodnot (a) získáme přímku (a'), kterou již můžeme proložit exponenciální funkcí, tedy další přímkou v semilogaritmickeém měřítku. Sklony těchto dvou přímek nám potom udají poločas rozpadu obou izotopů.

Část křivky vpravo jsme z aproximace vypustili, protože její hodnoty byly blízko pozadí, a tedy zatížené nezanedbatelnou chybou.

Získali jsme následující poločasy rozpadu:

Přímka	Izotop	$\lambda$ (s <sup>-1</sup> )	T (s)	Tabulková hodnota	Odchylka
				T (s)	
a'	<sup>110</sup> Ag	0,028543	24,3	24,6 [2]	1,2 %
b	<sup>108</sup> Ag	0,0045667	151,8	142,2 [3]	6,3 %

Oba poločasy jsme tedy byli schopni určit s odchylkou menší než 10 %.

## 5 Závěr

Z naměřených hodnot jsme vytvořili rozpadové křivky a ověřili jsme platnost rovnic pro přeměnu radionuklidů v soustavě dvou radioaktivních prvků v genetické souvislosti a nárůst aktivity radioaktivního prvku při konstantní rychlosti jeho tvorby. Pro tyto úkoly jsme využili radionuklidový generátor a určili jsme, jaké účinnosti eluce dceřiného radionuklidu jsme byli schopni dosáhnout. Dále jsme aktivací pomalými neutrony připravili izotopy <sup>108</sup>Ag a <sup>110</sup>Ag a stanovili jejich poločas rozpadu.

## Poděkování

Rádi bychom poděkovali Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské Českého vysokého učení technického v Praze za poskytnutí záštity k našemu vědeckému a intelektuálnímu rozvoji. Dále děkujeme našemu supervizorovi ing. Mojmíru Němcovi, Ph.D. za uvedení do problematiky a pomoc během vypracovávání miniprojektu.

## Reference

- [1]  $^{137}_{56}\text{Ba}$  – NuDat 2, <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/reCenter.jsp?z=56&n=81>, 15.6.2010
- [2]  $^{110}_{47}\text{Ag}$  – NuDat 2, <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/reCenter.jsp?z=47&n=63>, 15.6.2010
- [3]  $^{108}_{47}\text{Ag}$  – NuDat 2, <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/reCenter.jsp?z=47&n=61>, 15.6.2010
- [4] MAJER, V.: Základy jaderné chemie, Státní nakladatelství technické literatury, n. p., 1961, pp. 96–98
- [5] [http://www.fjfi.cvut.cz/kjch/materialy/RCHP/Uloha\\_10.PDF](http://www.fjfi.cvut.cz/kjch/materialy/RCHP/Uloha_10.PDF), 15.6.2010
- [6] [http://www.fjfi.cvut.cz/kjch/materialy/RCHP/RG\\_Ba.PDF](http://www.fjfi.cvut.cz/kjch/materialy/RCHP/RG_Ba.PDF), 15.6.2010