

RADIOAKTIVITA

- strana 3 – **Radioaktivita jako vlastnost látky**
 - strana 4 – **Základní veličiny pro výpočet radioaktivity vyšetřovaného vzorku**
 - **Úloha 1135:** Výpočet úbytku aktivity vzorku v čase (řešení úlohy je v čl. Záření)
 - strana 6 – **Druhy radioaktivních přeměn a jejich produkty**
 - **Úloha 1249:** Výpočet aktivity vzorku a určení produktů radioaktivity
 - strana 8 – **Radioaktivní odpad**
 - strana 10 – **Odkazy**
 - strana 11-14 – **Přílohy**
-

- **autor:** – ŠKORPÍK, Jiří (LinkedIn.com/in/jiri-skorpik)
- **datum vydání:** – Leden 2024; Leden 2025; Duben 2026 (3. vydání+přejmenování z Radioaktivita a ionizující záření)
- **název:** – Radioaktivita
- **sborník:** – *transformacni-technologie.cz/index.html#technicke-nauky*
- **provenience:** – Brno (Česká republika)

Copyright©Jiří Škorpík, 2024-2026
All rights reserved.

Radioaktivita jako vlastnost látky

*Radioaktivita je přírodní jev objevený až poté co pokročily jiné objevy ve fyzice, viz **Historické poznámky**. Radioaktivita je vlastnost některých druhů atomových jader samovolně se přeměňovat, takové druhy jader se nazývají **radionuklidy** (respektive radioizotop daného prvku). Při radioaktivní přeměně se změní složení jádra atomu a uvolní energie ve formě **kinetické energie produktů** této přeměny. Těmito produkty mohou být atomové elementární částice, fotony i jádra lehčích prvků, které obvykle pronikají do okolního prostředí jako záření. Existují i případy radionuklidů, kdy při radioaktivní přeměně nedojde ke změně složení jádra, ale pouze ke snížení jeho energetického obsahu a vyzáření fotonu, taková jádra nazýváme jadernými izomery. Produkty radioaktivních přeměn lze detekovat, protože jsou schopny atomy prostředí, kterým je vzorek obklopen, proniknou, *ionizovat*, respektive energeticky ovlivnit.*

~
Historické poznámky
k radioaktivitě

Objevitelé radioaktivity byly hned tři vědci pracující společně, francouzská vědkyně polského původu Marie Curie-Skłodovská (1867-1934), francouzský fyzik a chemik Pierre Curie (1859-1906) a především francouzský fyzik Antoine H. Becquerel (1852-1908) [Běhounek, 1945]. Hlavní přínos prvních dvou je, že dokázali izolovat prvky, které prokazatelně vykazovaly aktivitu v podobě ionizujícího záření od těch bez této aktivity – přitom objevili nové prvky Polonium a Radium. Také zavedli výraz radioaktivita. Becquerel ještě před nimi pozoroval ionizující záření některých nerostů (tím inspiroval oba manželé Curie v jejich směru).

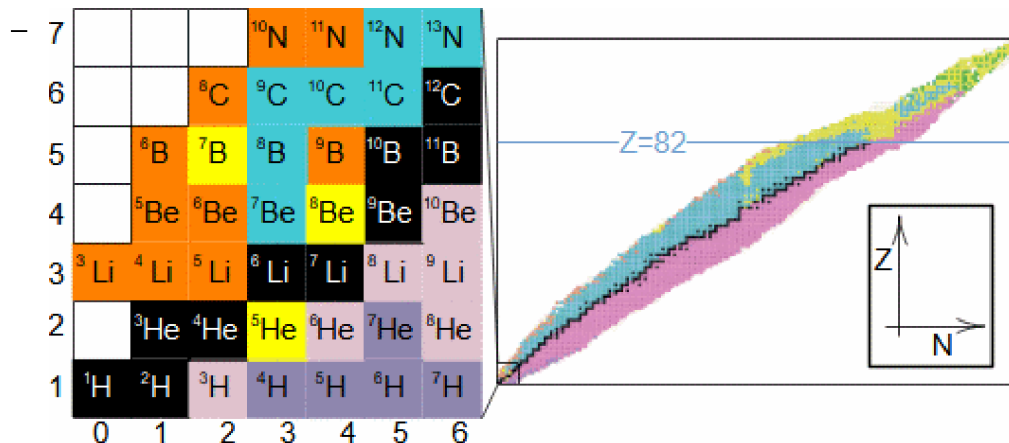
~
Definice
radionuklidu

Každý známý prvek má izotopy, jejichž atomová jádra obsahují počet protonů odpovídající danému prvku označovaném jako protonové číslo. Toto číslo je pro daný prvek neměnné, nicméně každý prvek má několik izotopů odlišujících se počtem neutronů v jádře, označovaném jako neutronové číslo. Na počtu protonů v jádře závisí, zda je daný izotop radioaktivní či nikoliv, přičemž každý prvek do protonového čísla 82 (olovo) má mimo radioizotopů také alespoň jeden izotop stabilní (neradioaktivní). Navíc radioaktivní přeměně podléhá i volný neutron. U volných protonů a volných elektronů zatím nebyl zaznamenán samovolný rozpad.

Tabulka stabilních
izotopů a
radioizotopů

Na Obrázku 313 (s. 4) je tabulka prvků do protonového čísla 117 a jejich izotopů. Na každém řádku jsou vypsány do buněk tabulky jednotlivé známé izotopy daného prvku, přičemž číslo řádku odpovídá protonovému číslu tohoto prvku a číslo sloupce tabulky odpovídá počtu neutronů v jádře. Buňky s černým pozadím označují stabilní izotop, to znamená, že izotopy ve světlých buňkách jsou radioizotopy daného prvku.

– 313:



Z [-] protonové číslo; N [-] neutronové číslo. Horní index u značky prvku označuje nukleonové číslo (součet protonů a neutronů v jádře). Barvy jednotlivých izotopů označuje druh radioaktivní přeměny, viz. následující kapitola. Obrázek vpravo je převzat z [Wikimedia Commons].

Přírodní vs. umělé radionuklidy

Výše uvedení vědci pozorovali radioaktivitu přírodních radionuklidů a jednotlivé prvky získávaly na základě rozdílných chemických vlastností z přírodních nerostů. Na povrchu Země se vyskytují atomy radionuklidů ve velmi malých koncentracích, takže takto získaný radioaktivní materiál byl jednak v malém množství jednak byl drahý, proto se ho využívalo pouze pro vědecké účely a lékařské (rentgen, radioterapie..). Dnes většinou získáváme potřebné množství radionuklidů uměle jako vedlejší produkty při jaderných reakcích. Pomocí stopování umělých radionuklidů vzniklých při jaderných testech v tělech v té době již dospělých lidí bylo mimo jiné dokázáno, že i dospělým lidem se mozkové buňky regenerují.

~
Kinetická energie uvolněná při radioaktivní přeměně

Produkty radioaktivních přeměn mají kinetickou energii, která se maří uvnitř látky vzájemnými srážkami, což se navenek projeví ohřevem. Teplo vznikající při radioaktivních přeměnách je problém například při skladování radioaktivních látek a především použitého jaderného paliva z jaderných elektráren. Naopak teplo z radioaktivních přeměn je využíváno v radioizotopových generátorech, ve kterých se toto teplo využívá pro výrobu tepla či elektřiny například u strojů určené pro práci mimo Zemi.

Základní veličiny pro výpočet radioaktivity vyšetřovaného vzorku

*Kvantitativní veličiny radioaktivních přeměn vyšetřovaného vzorku radionuklidů jsou **aktivita, přeměnová konstanta a poločas přeměny.***

~
Aktivita

Ve vyšetřovaném vzorku radionuklidů můžeme sledovat jejich radioaktivní přeměny, přitom počet radioaktivních přeměn za vteřinu označujeme veličinou aktivita A^+ , jejíž značkou je Becquerel, viz **Vzorec 536** (s. 5).

– 536: –

$$\left. \begin{aligned} A^+ &= -\frac{dR}{dt}; \quad \lambda = \frac{A^+}{R} \\ \Delta R &= R_0(1 - e^{-\lambda\tau}) \end{aligned} \right\} \Rightarrow T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

A^+ [$1 \cdot s^{-1}$; Bq] aktivita (počet radioaktivních přeměn za vteřinu); R [-] počet přítomných atomů radionuklidu – dR tedy znamená úbytek počtu přítomných radionuklidů v důsledku radioaktivních přeměn jeho jader; t [s] čas; λ [s^{-1}] přeměnová konstanta; $T_{1/2}$ [s] poločas přeměny; ΔR [-] úbytek počtu radioaktivních jader ve vyšetřované množině; R_0 [-] počet radioaktivních jader na počátku sledování; τ [s] doba, která uplynula od počátku sledování. Vzorec pro výpočet úbytku radioaktivních jader ve vyšetřovaném souboru je odvozen v **Příloze 536**.

~
Přeměnová konstanta

Protože pravděpodobnost radioaktivní přeměny jednotlivých nuklidů je stejná, tak podíl aktivity a počtu radionuklidů ve vzorku bude konstantní – tento poměr se nazývá přeměnová konstanta radionuklidu λ , viz **Vzorec 536**. Například je-li přeměnová konstanta vzorku rovna $1 \cdot 10^{-2} s^{-1}$, pak to znamená, že vzorku každou vteřinu proběhne radioaktivní přeměna u 1 % z přítomného počtu radionuklidů.

~
Poločas přeměny

Doba, za kterou ve vyšetřovaném vzorku proběhne radioaktivní přeměna přesně u poloviny atomů se nazývá poločas přeměny $T_{1/2}$, která je definována **Vzorcem 536**. Poločas přeměny je statistickou veličinou odvozenou pro velký soubor atomů radionuklidu, takže v případě dvou atomů radionuklidu automaticky neplatí, že u jednoho z nich dojde po uplynutí poločasu přeměny k radioaktivní přeměně se 100% pravděpodobností, ale 50% pravděpodobností atd.

Zvláštnosti
radionuklidů s
krátkým poločasem
přeměn

Poločasy přeměny některých radionuklidů jsou tak krátké, že je v přírodě nenajdeme, protože jejich jádra se rozpadla. Například izotop vodíku tritium má poločas přeměny přibližně 12,32 let. Velmi krátký poločas přeměny je hlavní problém při výrobě těžších prvků. Ty se obvykle vyrábí tak, že se do jádra těžkého radioaktivního izotopu přidávají protony a neutrony, přitom tento proces musí být výrazně rychlejší než poločas přeměny.

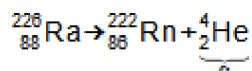
Druhy radioaktivních přeměn a jejich produkty

Existenci více druhů radioaktivních přeměn (cizím slovem transmutace) potvrdily experimenty britského fyzika novozélandského původu Ernesta Rutherforda (1871-1937). Objevené nové druhy přeměn označil α , β přeměnou. Později byly objeveny další druhy radioaktivních přeměn jako pozitronová přeměna, neutronová přeměna, samovolné štěpení a izomerický přechod. Na **Obrázku 313** (s. 4) jsou radionuklidy odlišeny podle typu přeměny, ale některé radionuklidy mohou podléhat více typům radioaktivních přeměn s různou pravděpodobností, přičemž jedna radioaktivní přeměna může být také zdrojem více druhů produktů (záření). Přesné údaje o radioaktivních přeměnách jednotlivých radionuklidů lze nalézt v tabulkách, například [Hála, 1998].

~
Alfa přeměna

α -přeměna se vyskytuje u radioaktivních nuklidů těžkých prvků, kde se v jádru projevuje silné odpuzování protonů (nízký podíl neutronů). Při této přeměně jádro emituje (vyzáří) jádro helia, **Vzorce 540**. Jádro Helia je současně částice α -záření. Radionuklidy podléhající převážně α -přeměně jsou označeny na **Obrázku 313** (s. 4) žlutě.

– 540: –



α -jádro helia, též částice α -záření; Ra-Radium; Rn-Radon; He-Helium.

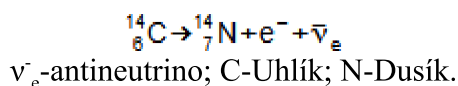
~
Beta přeměna

Při β -přeměnách jsou vyzařeny z jádra elektrony. β -přeměna vzniká při přeměně neutronu v jádře radionuklidu na proton. Radionuklidy podléhající převážně β -přeměně jsou označeny na **Obrázku 313** (s. 4) růžově.

Radiokarbonová
metoda s beta
přeměnou pro
datování úmrtí
organismů

β -přeměny se využívá k datování úmrtí organismu pomocí radiokarbonové metody podle **Vzorce 538**. Radionuklid uhlíku ${}^{14}\text{C}$ vzniká v horních vrstvách atmosféry reakcí kosmického záření s dusíkem, při které transmutuje právě na radionuklid ${}^{14}\text{C}$. Tento radionuklid se prostřednictvím molekuly CO_2 dostává do živých organismů. Díky metabolismu organismu se uhlík v organismu vyměšuje a zase přijímá. Po odumření organismu se tato výměna zastaví a radionuklid ${}^{14}\text{C}$ se rozpadá s poločasem přeměny 5730 let na izotop dusíku ${}^{14}\text{N}$ podle uvedené rovnice. Z poměru obsahu izotopů ${}^{14}\text{C}$ a ${}^{14}\text{N}$ v odumřelém organismu lze tedy určit dobu, kdy organismus zemřel.

– 538: –



$\bar{\nu}_e$ -antineutrino; C-Uhlík; N-Dusík.

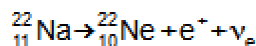
*Beta přeměna
volných neutronů*

Beta přeměně podléhá i volný neutron, jeho střední délka života mimo jádro je $877,75 \pm 0,34$ s [Gonzalez, 2021]. Rozpadá se na proton a elektron.

~
*Pozitronová přeměna
u umělých
radionuklidů*

Mimo přeměny- β_- se vyskytuje i přeměna- β_+ , kdy se uvolňuje z jádra kladně nabitý elektron, nazývaný pozitron. Tento typ přeměny se vyskytuje u umělých radionuklidů. Vzniká při přeměně nadbytečných protonů v jádře na neutron, elektron a neutrino, například podle **Vzorce 539**. Radionuklidy podléhající převážně pozitronové přeměně jsou označeny na **Obrázku 313** (s. 4) modře.

– **539:** –



e^+ -pozitron – opačně nabitý elektron (částice β_+ -záření); ν_e -neutrino; Na-Sodík; Ne-Neon.

~
Neutronová přeměna

Neutronová přeměna s vyzářením neutronu z jádra je typická pro radionuklidy s velkým přebytkem neutronů oproti stabilnímu stavu. Například vodík ${}^6\text{H}$ přechází neutronovou přeměnou na vodík ${}^5\text{H}$. Radionuklidy podléhající převážně neutronové přeměně jsou označeny na **Obrázku 313** (s. 4) fialově.

~
*Samovolné štěpení
velmi těžkých jader*

Samovolné štěpení jader je typické pro velmi těžké jádra radionuklidů, které se mohou roštěpit bez vnějších zásahů na dvě lehčí jádra. Samovolné štěpení bylo objeveno v roce 1940 sovětskými fyziky Georgijem Fljorovem (1913-1990) a Konstantinem Petržakem (1907-1998). Z principu samovolného štěpení mohou být jeho produkty alfa záření, protony, neutrony, což se označuje jako emise nukleonů. Radionuklidy podléhající převážně samovolnému štěpení jsou označeny na **Obrázku 313** (s. 4) zeleně.

~
*Izomerický přechod s
uvoněním γ -záření*

Za izomerický přechod jádra je považováno energetické přeskupení nukleonů, které zahrnuje i vyzářením fotonu s energiemi v řádech vyšších jak 10^4 eV, tzv. γ -záření. Přičemž tato změna přichází po některé jiné radioaktivní přeměně jádra s takovým zpožděním, že tento přechod je považován za samostatnou událost s vlastním poločasem přeměny. V tabulkách se jaderný izomer obvykle označuje písmenem-m u nukleonového čísla. Jaderné izomery se používají jako zdroje fotonů u zobrazovacích metod, zejména ve zdravotnictví.

– **Úloha 1249:** –

Alexandr Litviněnko zemřel na následky ozáření v roce 2006 poté co spolknul přibližně 10 μg radioaktivního polonia (izotop 210) [Gray, 2012, s. 195]. Vypočítejte: (a) jakou efektivní ekvivalentní dávku by obdrželo lidské tělo za 24 h po spolknutí čistého polonia (uvažujte izotop 210) – vyhodnoťte dopady při rovnoměrném zasažení celého organismu; (b) aktivitu pro případ čistého polonia a pro případ, kdy uplyne doba od výroby jeden rok. Za hmotnost těla dosaďte svou vlastní hmotnost.

Řešení úlohy je uvedeno v **Příloze 1249**.

Radioaktivní odpad

Radioaktivním odpadem označujeme takové látky, které obsahují radionuklidy a dále jsou jejich vlastníky označeny za odpad, protože je nelze dále využívat nebo prodat. Takové látky zpravidla vznikají uměle v jaderných reaktorech nebo při ozáření ionizujícím zářením. Takové látky je nutné bezpečně uložit, zpravidla nejprve v tzv. **meziskladu nepotřebných radioaktivních látek** a po nějaké době v tzv. **konečném úložišti radioaktivního odpadu**. Radioaktivní látky z pohledu skladování rozdělujeme na nízko, středně a vysokoradioaktivní. Nízko a středně aktivní odpady se dělí na krátkodobé, které mají poločasu přeměny kratší než 30 let a aktivita zdrojů α -záření dosahuje max. $4 \text{ MBq} \cdot \text{kg}^{-1}$ a na dlouhodobé. Vysoce aktivní odpady jsou definovány jako ty, které vyvíjejí teplo a při skladování je nutné je chladit.

~
Mezisklad
nepotřebných
radioaktivních látek
včetně použitého
jaderného paliva

Mezisklad slouží ke kontrolovanému dočasnému uskladnění radioaktivních látek dokud jejich aktivita neklesne tak, aby mohly být trvale (bez nutného chlazení) uloženy. Ve meziskladech radioaktivních látek se z velké většiny skladuje použité jaderné palivo a v menší míře i jiné radioaktivní látky a látky kontaminované radionuklidy, které vznikly při provozu jaderných elektráren a dalších radiačních zařízeních (použité součástky a přístroje, ochranné pomůcky atd.). Všechny tyto látky musí být bezpečně odděleny od životního prostředí (nebezpečí úniku ionizujícího záření a případně únik radioaktivních částic do okolí).

Látky s vysokou
aktivitou v
meziskladu

V případě radioaktivních látek s vysokou aktivitou, což jsou i použité kazety s palivem jaderných reaktorů je nutné zajistit jejich chlazení, jinak může dojít k jejich roztavení a výpary mohou kontaminovat okolí radioaktivními částicemi. Podle metody chlazení se mezisklady rozdělují na suché (chlazení vzduchem) a mokré (chlazení vodou – bazén). Prvním meziskladem použitého jaderného paliva je bazén vedle reaktoru.

Mezisklad v areálu
Jaderné elektrárny
Dukovany (EDU)

V ČR je zatím pouze jeden mezisklad radioaktivních látek a použitého jaderného paliva, který je umístěn v areálu EDU. Jedná se o suchý mezisklad. Použité palivové kazety jsou nejdříve uloženy ve speciálních bezpečnostních kontejnerech (**Obrázek 533** (s. 9)), které chrání kazety před mechanickým poškozením. Celý sklad je neustále chlazen cirkulujícím vzduchem proudícím mezi kontejnery. V areálu EDU je také úložiště nízko a středně radioaktivních odpadů, které je ve vlastnictví státu.

– 533: –



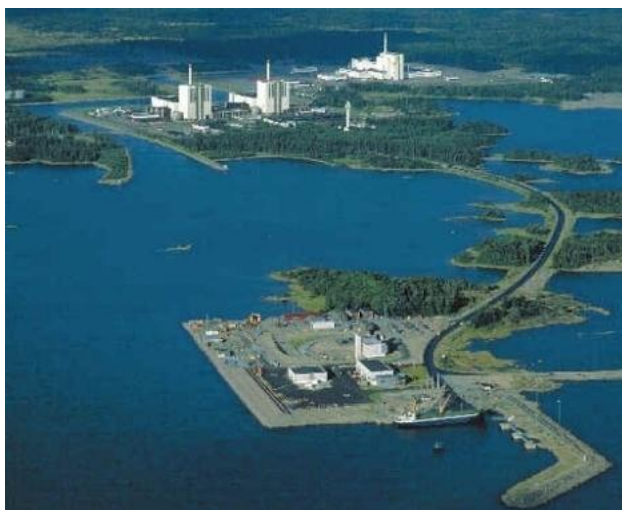
Obrázek ČEZ, a.s.

~
Konečné úložiště
radioaktivního
odpadu

Tento typ skladu musí dokázat uchovat bezpečně radioaktivní odpad po dobu až 100 000 let dokud radioaktivní pozadí jeho obsahu nebude rovno přirozenému pozadí. Konečná úložiště jsou zároveň hlubinná umístěné v horninovém nebo jílovém masívu, aby jím nemohla prosakovat voda. Musí být také v geologicky klidné lokalitě [Marek, 2020]. V současnosti se taková úložiště teprve budují, viz **Obrázek 534**, respektive naplňují.

– 534: –

Pohled na hlubinné
úložiště jaderného
odpadu u jaderné
elektrárny Forsmark
(Švédsko)



Nachází se 1,5 km od pobřeží a samotné úložiště je 80 m pod dnem Baltského moře v granitových horninách. V blízkosti úložiště je i stejnojmenná jaderná elektrárna (na obrázku v pozadí).
Obrázek Forsmark

Označení konečného
úložiště pro budoucí
generace

Významným problémem hlubinného úložiště je také jeho označení tak, aby i budoucí generace pochopili, že na uvedeném místě se nachází radioaktivní odpad. Po naplnění konečného úložiště bude tento prostor zcela opuštěn, a tím i v podstatě končí jakékoliv závazky původních majitelů odpadu vůči okolí. například z toho důvodu bude kolem hlubinného úložiště WIPP (waste isolation pilot projekt) v Novém Mexiku zbudováno několik žulových sloupů a přímo nad úložištěm mohyla ze zeminy s komorou uvnitř, opět ohraničenou masivními žulovými sloupy a s nápisem Zákaz vstupu + informace o úložišti. Navíc informaci o úložišti bude v archivech po celém světě. Naopak okolí Finského úložiště Onkalo bude navraceno do původního stavu (borový les), bez sebemenší připomínky co pod povrchem leží [Anon., 2021].

Odkazy

- ANON., 2021, Poselství do budoucnosti aneb Jak označit místo s nejnebezpečnějším odpadem světa, *Technický týdeník*, (18), ISSN 0040-1064.
- BĚHOUNEK, František, 1945, *Svět nejmenších rozměrů*, Jaroslav Tožička, Praha.
- GONZALEZ, F. M., et al., 2021, Improved Neutron Lifetime Measurement with UCN τ , *Phys. Rev.*, 127(16), DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.162501.
- GRAY, Theodore W., 2012, *Prvky: obrazový průvodce všemi známými atomy ve vesmíru*, Slovart, Praha, ISBN 978-80-7391-544-5.
- HÁLA, Jiří, 1998, *Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie*, KONVOJ, Brno, ISBN 80-85615-56-8.
- MAREK, Jiří, 2020, Jsou radioaktivní odpady limitujícím faktorem rozvoje jaderné energetiky?, *All for power*, (2), AF POWER agency, a.s., Praha, ISSN 1802–8535.
-