

RADIOAKTIVITA A IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ

Jiří Škorpík, skorpik.jiri@email.cz

- 23.3 Ionizující záření
 - 23.4 Radioaktivita
 - 23.6 Druhy radioaktivních přeměn a jejich produkty
 α přeměna – β přeměna – γ přeměna – Kinetická energie částic
 - 23.8 Pohlcování ionizujícího záření
Dávka záření – Pronikavost
 - 23.9 Biologické účinky ionizujícího záření
 - 23.11 Úloha 1: Výpočet ekvivalentní dávky a aktivity radioaktivní
částice v lidském těle
 - 23.11 Odkazy
 - 23.13 Přílohy
-

Autor: ŠKORPÍK, Jiří, ORCID: 0000-0002-3034-1696

Datum vydání: Leden 2024

Název článku: Radioaktivita a ionizující záření

Název on-line zdroje: Transformační technologie (on-line journal at transformacni-technologie.cz; engineering-sciences.education; engineering-sciences.education; stirling-engine.education)

ISSN: 1804-8293

Copyright©Jiří Škorpík, 2024
All rights reserved.

Ionizující záření

Prostředí
 Ionizace
 Excitace
 Viditelné (sluneční)
 paprsky
 Wilhelm Röntgen
 Neviditelné
 γ -záření
 Foton
 β -záření
 α -záření
 Neutronové záření

Záření, které má tak vysokou energii, že je schopno při průchodu prostředím elektronové obaly atomů ionizovat nebo jejich jádra excitovat se nazývá ionizující záření. Přírodním ionizujícím zářením je sluneční světlo. Sluneční světlo mění například barvu bílého papíru, fotochemická tvorba fotografie je založena na ionizačních vlastnostech viditelného světla, sluneční světlo dokáže rozkládat slabé chemické vazby některých léků – proto jsou baleny do tmavých lahvíček – apod. Proto až do roku 1895 bylo záření spojováno s viditelností. Toho roku přišel velký zlom ve vnímání záření objevem německého fyzika Wilhelma Conrada Röntgena (1845-1923), který objevil "neviditelné" záření. Přesněji při experimentech se skleněnou výbojkou objevil záření, které dnes označujeme jako γ -záření, která má ovšem stejnou podstatu jako sluneční záření neboť se jedná o proud fotonů²², ale s mnohem větší energií. Později, v souvislosti s radioaktivitou a jadernými reakcemi, viz další kapitola, bylo objeveno záření elektronové (proud elektronů) označované jako β -záření, záření označované jako α -záření, což je proud jader Helia a jako poslední bylo objeveno záření neutronové.

Ionizace
 Radioaktivita
 Neutronové záření

Každé prostředí je jinak odolné, takže jistý druh záření v jednom prostředí, nemusí být bráno jako ionizující, ale v jiném méně odolném prostředí už za ionizující být považováno může. Pro ionizující záření se vžily i názvy jaderné nebo radioaktivní záření. Jaderné je věcně správný avšak zahrnuje pouze ionizující záření vzniklé v jádrech atomu. Radioaktivní je ale chybný, protože ionizující záření samo o sobě není radioaktivní (je už produkt radioaktivity). Výjimkou je záření neutronové, protože volné neutrony se po několika minutách rozpadají za vzniku ionizujícího záření.

Přírodní zdroje
 Umělé zdroje
 Kosmické záření
 Ionizace atmosféry
 Sluneční záření

Nejčastějším zdrojem ionizujícího záření bývají radioaktivní přeměny na Zemi (přírodní i umělé) a kosmické záření přicházející z okolního vesmíru, které vyzařují hvězdy a jiné aktivní útvary po zhroucení hvězd a naše Slunce. Mezi kosmické záření patří i slabé reliktní záření pocházející z období vzniku vesmíru. Kosmické záření je z drtivé většiny zachyceno elektromagnetickým polem Země a molekulami atmosféry Země, proto je ve vyšších vrstvách atmosféry tolik iontů [Atkins, 2005, s. 25]. Kosmické záření nemá energii dostatečnou k tomu, aby proniklo až k jádrům atomů a viditelné světlo pro většinu látek ionizujícím zářením není, poněvadž má malou energii.

Radioaktivní materiál
ITER

Pohlcením ionizujícího zářením se z jádra může stát radioizotop daného prvku, nebo může transmutovat na radioaktivní izotop jiného prvku. Obvykle takto vytvořené radioizotopy mají krátký poločas rozpadu. Například materiály termionukleárního reaktoru ITER, které se stanou po provozu radioaktivní, byly vybrány tak, aby vzniklé radioizotopy měly poločas rozpadu v řádech desítek let, takže zhruba po sto letech by měly být neradioaktivní a bylo by možné je recyklovat.

Radioaktivita

Radioaktivita
Radioizotop
Radioaktivní přeměna
Transmutace
Deexcitace
Vazebná energie
Ionizující záření

Radioaktivita je vlastnost jader radioizotopů samovolně se rozpadat. Proces rozpadu se nazývá radioaktivní přeměna. Během radioaktivní přeměny jádro buď transmutuje (proces kdy se nemění nukleonové číslo, ale pouze počet protonů v jádře [Hála, 1998, s. 31]) nebo deexcituje (nemění se počet protonů ani neutronů). Při těchto procesech se uvolní část vazebné energie jádra ve formě fotonů a kinetické energie produktů radioaktivní přeměny – to jsou vnější projevy radioaktivity označované jako ionizující záření.

Marie Curie-
Sklodovská
Pierre Curie
Antoine H. Becquerel
Radioaktivita

Objevitelé radioaktivity byly hned tři vědci pracující společně, francouzská vědkyně polského původu Marie Curie-Sklodovská (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).

Přírodní radioizotopy
Umělé radioizotopy

Uvedení vědci pozorovali radioaktivitu přírodních radioizotopů a jednotlivé prvky získávali na základě rozdílných chemických vlastností z přírodních nerostů. Na povrchu Země se vyskytují atomy radioizotopů ve velmi malých koncentracích, takže takto získaný radioaktivní materiál byl jednak v malém množství jednak byl drahý, proto se ho využívalo pouze pro lékařské a vědecké účely (rentgen, radioterapie..). Dnes většinou získáváme potřebné množství radioizotopů uměle jako vedlejší produkty při štěpných reakcích.

Aktivita
Becquerel
Přeměnová konstanta
Poločas přeměny

Ve vyšetřovaném vzorku radionuklidů můžeme sledovat jejich radioaktivní přeměny, přitom počet radioaktivních přeměn za vteřinu označujeme veličinou aktivita, jejíž značkou je Becquerel. 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. Například je-li přeměnová konstanta vzorku rovna $1 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, pak to znamená, že vzorku každou vteřinu proběhne radioaktivní přeměna u 1 % z přítomného počtu radionuklidů. Doba, za kterou ve vyšetřovaném vzorku proběhne radioaktivní přeměna přesně u poloviny atomů se nazývá poločas přeměny, která je definována Vzorcem 1.

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

1: Aktivita, přeměnová konstanta a výpočet úbytku radioaktivních jader

λ [s^{-1}] přeměnová konstanta; A^+ [$1 \cdot \text{s}^{-1}$; 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; $T_{1/2}$ [s] poločas přeměny; n [mol] látkové množství atomů radionuklidu; N_A [mol^{-1}] Avogadrova konstanta; 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 2.

Poločas přeměny

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.

Tritium
Poločas přeměny

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.

Neutron
Proton
Elektron

Přeměněm podléhá i volný neutron, jeho střední délka života mimo jádro je $877,75 \pm 0,34 \text{ s}$ [Gonzalez, 2021]. U volných protonů a volných elektronů zatím nebyl zaznamenán samovolný rozpad.

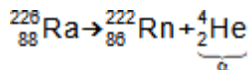
Druhy radioaktivních přeměn a jejich produkty

Ernest Rutherford

Při radioaktivní přeměně přijde jádro o část energie, kterou vyzáří ve formě záření. To, že všechna ionizující záření nejsou stejná objevil už Becquerel, ale až britský fyzik novozélandského původu Ernest Rutherford (1871-1937) definitivně identifikoval tři druhy ionizujících záření uvolněných při radioaktivních přeměnách, které označil počátečními písmeny řecké abecedy α , β a γ . Přičemž přeměna jednoho izotopu může být zdrojem i více jak jednoho druhu, ale obvykle jeden druh převažuje. Podle druhu převažujícího záření se označují typy radioaktivních přeměn také jako α -přeměna, β -přeměna, γ -přeměna. Produktem radioaktivní přeměny nejsou jen částice záření, ale i zbylé nukleony v jádře jejichž stav se mohl změnit a produktem je také uvolněná energie ve formě kinetické energie částic.

α -přeměna
Radium Ra
Radon Rn
Helium He
 α -záření

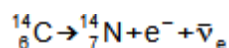
α -přeměna se vyskytuje u přirozených i umělých radioaktivních nuklidů těžkých prvků, kde se v jádru projevuje silné odpuzování protonů (nízký podíl neutronů). Při této přeměně jádro emituje (vyzáří) jádro helia, Vzorce 2. Jádro Helia je současně částice α -záření, například podle.



2: Příklad α -přeměny
 α -jádro helia, též částice α -záření.

β -přeměna
 β -přeměna
Transmutace
Radiokarbonová
metoda
Uhlík C
Dusík N
Elektron
 β -záření
Antineutrino

Při β -přeměnách jsou vyzářeny z jádra elektrony. β přeměna vzniká při přeměně neutronu v jádře radionuklidu na proton. Této přeměny, respektive transmutace se využívá k datování úmrtí organismu pomocí radiokarbonové metody, kdy se využívá β přeměny podle Vzorce 3. Radionuklid ${}^{14}\text{C}$ vzniká v horních vrstvách atmosféry reakcí kosmického záření s dusíkem. Tento radionuklid se prostřednictvím molekuly CO_2 dostává do živých organismů. Díky metabolismu organismu se neustále 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. Vyzářený elektron je částicí β -záření.



3: Příklad β_- -přeměny

$\bar{\nu}_e$ -antineutrino.

β_- -přeměna

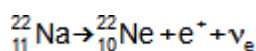
Sodík Na

Neon Ne

Pozitron

Neutrino

Mimo přeměny- β_- , kdy se uvolňuje z jádra elektron se vyskytuje i přeměna přeměna- β_+ , kdy se uvolňuje z jádra kladně nabitý elektron, zvaný pozitron. Tento typ přeměny se vyskytuje u radioaktivních nuklidů připravených jadernými reakcemi. Vzniká při přeměně nadbytečných protonů v jádře na neutron, elektron a neutrino, například podle Vzorce 4.



4: Příklad β_+ -přeměny

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

γ -přeměna

Deexcitace jádra

γ -záření

Jaderný izomer

Při γ -přeměnách jsou vyzářeny z jádra fotony. γ -přeměna je spojena s nějakou předchozí jadernou událostí (například jiným typem jaderné přeměny). Taková jádra se velmi často vyskytují v excitovaném stavu, protože po změnách v počtu nebo typu nukleonů v jádře se nemusí nukleony vyskytovat v nejnižších možných energetických stavech. Následuje proto reorganizace nukleonů do energeticky výhodnějšího stavu – deexcitace jádra. Přitom dojde k emisi fotonů s energiemi v řádech vyšších jak 10^4 eV (γ -záření). Emise γ může být velice opožděná za předchozí radioaktivní přeměnou, respektive má vlastní poločas přeměny nezávislý na poločasu předchozí přeměny. Nuklid v excitovaném stavu s delším poločasem přeměny- γ se nazývá jaderný izomer.

Kinetická energie částic

Použité jaderné palivo

Radioizotopový generátor

Produkty radioaktivních přeměn mají kinetickou energii. Zatím co při chemických reakcích se uvolňuje maximálně několik desítek eV na atom, tak při jaderných přeměnách se může uvolnit až několik miliónů eV na jeden atom. Energie uvolněná při radioaktivních přeměnách je problém například při skladování radioaktivních látek a především použitého jaderného paliva z jaderných elektráren [Škorpík, 2022], které je radioaktivní – musí se chladit, protože část kinetické energie částic se nárazy transformuje na teplo). 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.

Pohlcování ionizujícího záření

Ionizující záření má na prostředí nějaké účinky, pokud je tímto prostředím pohlceno. Množství pohlcené energie vyšetřovaným prostředím se nazývá dávka záření. Nicméně ionizujícího záření také může prostředím pouze procházet, nebo se od něj odrážet, takže dávka záření závisí na tom jak účinně je ionizující záření pohlcováno vyšetřovaným prostředím k tomu se používá veličina zvaná pronikavost ionizujícího záření.

Dávka záření
Gray

Prostředí, které pohltní ionizující záření získá energii ε [J], což je energie sdělená látce. Dávka záření je veličinou vyjadřující velikost sdělené energie na 1 kg látky. Jednotkou dávky záření je 1 Gy (Gray), přičemž 1 Gy znamená energii 1 joulu absorbovanou 1 kg látky, viz Vzorec 5.

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm}$$

5: Dávka záření

D [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$, Gray] dávka záření; ε [J] energie sdělená látce; m [kg] hmotnost látky.

Dávkový příkon

Rychlost s jakou je energie látce sdělována vyjadřuje dávkový příkon, viz Vzorec 6.

$$D = \frac{dD}{dt}$$

6: Dávkový příkon

D [$\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$; $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$] dávkový příkon; t [s] čas.

Pronikavost
 α -záření
 β -záření
 γ -záření
Vzduch
Olovo

Pronikavost ionizujícího záření závisí na druhu záření, druhu prostředí a jeho povrchu, od kterého se může i odrážet. Například α -záření je zcela pohlceno až vrstvou vzduchu o tloušťce 10 cm, β -záření je zcela pohlceno až vrstvou vzduchu o tloušťce 20 cm (jeho pronikavost je větší než u α -záření) a energie γ -záření se sníží na $10\,000\,000^{-1}$ původní úrovně až po průchodu 35 cm tlustou vrstvou olova [Něstěrenko a kol, 1959, s. 97 až 99]. Jinými slovy to znamená, pravděpodobnost pohlcení nějakou látkou je u α -záření větší než β -záření a u toho zase větší než γ -záření.

Biologické účinky ionizujícího záření

Buňka
Mutace DNA
Dávka záření
Atomární smrt

Pozorovatelné účinky ionizujícího záření mají svůj počátek vždy v dějích, které ionizující záření vyvolává v buňkách (rozklad sloučenin). Zpravidla platí, že buňky, které se nedělí (nerozmnožují) nebo se dělí pomalu jsou odolnější, než buňky, které se dělí rychleji (vlasy) – přesněji pravděpodobnost, že se mutace rozšíří je u buněk s nižší frekvencí dělení menší. Nejzávažnější jsou změny v DNA. Jakýkoliv zásah do biochemického cyklu DNA má za následek selhání buněk, které přestanou vytvářet potřebnou bílkovinu nebo mohou vytvářet bílkoviny, které jsou pro tělo cizí nebo dokonce toxické. Biologické účinky ionizujícího záření závisí na dávce záření a době za jakou je tělu sděleno, ovšem při dávkách $>10^3$ Gy hynou buňky již během ozařování v důsledku rozkladu molekul (atomární smrt).

Kmenové buňky
Regenerace
Frakcionace dávky

Buňky však mají jistou schopnost poškození opravit. Náhradu za odumřené buňky zajišťují v lidském těle tzv. kmenové buňky. Procesu náhrady buňky za novou pomocí kmenových buněk se nazývá regenerace tkáně. Problém nastane, pokud obdržená dávka v nějaké části lidského těla je tak vysoká, že kompletně zlikviduje i kmenové buňky v dané oblasti, respektive jejich schopnost se množit (ztráta DNA) – kmenové buňky jsou totiž specializované pro tu část těla, ve které se nalézají a daná část těla schopnost regenerace tedy ztratí a pouze umírá. Nicméně v lidském těle se během jeho vývoje nacházejí univerzální kmenové buňky, ale pro jejich přenos (transplantaci do jiné části těla) a uchování je nutný lékařský zákrok. Prakticky to znamená, že při určité dávce je poškození organismu menší, je-li dávka buď rozprostřena rovnoměrně na delší dobu, nebo rozdělena na několik menších dávek s časovými prodlevami mezi nimi (frakcionace dávky), tak aby zasažená tkáň regenerovala rychleji než odumírala.

Jakostního faktoru
Foton
Dávkový ekvivalent
Sievert

Účinek na tkáň podstatně závisí také na druhu ionizujícího záření. Např. neutrony způsobí v živé tkáni větší „škodou“ než elektrony a částice- α zase větší škodu než neutrony. Biologická účinnost jednotlivých druhů záření na tkáň se vyjadřuje pomocí tzv. jakostního faktoru, přičemž jakostní faktor rovný jedné odpovídá účinkům fotonového záření. Dávka záření vynásobená jakostním faktorem se nazývá dávkový ekvivalent a jeho jednotkou je 1 Sievert [Sv; $J \cdot kg^{-1}$]. Dávkový ekvivalent tedy zahrnuje fyzikální veličinu dávka záření, druh záření a míru vlivu na danou tkáň v porovnání s fotonovým zářením.

Lidský organismus
Ekvivalentní dávka
Radiační váhový faktor

V praxi se jakostní faktor velmi špatně určuje a pro přibližné, ale dostatečné, určení účinků ionizujícího záření na lidský organismus se místo dávkového ekvivalentu používá veličina zvaná ekvivalentní dávka definovaná Vzorcem 7.

$$H_T = w_R \cdot D$$

7: Ekvivalentní dávka

H_T [Sv] ekvivalentní dávka; w_R [1] radiační váhový faktor, viz Tabulka 8.

druh záření	w_R	druh záření	w_R
fotony a elektrony všech energií	1	neutrony o energii 0,1...2 MeV	20
neutrony o energii 10 keV	5	neutrony o energii 2...20 MeV	10
neutrony o energii 10...100 keV	10	α záření	20

8: Radiační váhové faktory

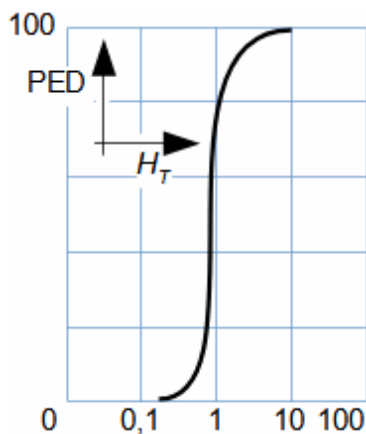
w_R [1]. Zdroj dat [Hála, 1998, s. 145].

Lidské orgány
Ekvivalentní dávka
Dávkový ekvivalent
Efektivní dávku
Tkáňový váhový faktor

Abychom se s výpovědní hodnotou ekvivalentní dávky přiblížili skutečnému dávkovému ekvivalentu musíme ještě přepočítat ekvivalentní dávku na tzv. efektivní dávku. Efektivní dávka je hodnota ekvivalentní dávky vynásobená tkáňovým váhovým faktorem příslušný zasaženému orgánu, například pro žaludek je tento faktor 0,12 a pro kůži 0,01 [Hála, 1998]. Komplikovanost stanovení ekvivalentní dávky v lidském těle ilustruje Úloha 1.

Stochastické účinky
Deterministické účinky
Prahová ekvivalentní dávka

Zejména z pohledu ochrany lidí před ionizujícím záření rozlišujeme tzv. stochastické účinky a deterministické účinky. Stochastické účinky ionizujícího záření se neprojevují akutní nemocí z ozáření, ale zvýší se pravděpodobnost onkologického onemocnění někdy v budoucnu oproti situaci bez ozáření nebo změny v DNA, které se projeví v další generaci. Deterministické účinky ionizujícího záření se projeví ve velmi krátké době, viz Obrázek 9, na kterém je závislost pravděpodobnosti úmrtí způsobené ekvivalentní dávkou – jedná se o tzv. prahovou ekvivalentní dávku.



9: Odezva lidského organismu na ozáření

PE_D [%] prahová ekvivalentní dávka; H_T [Sv] ekvivalentní dávka (rovnoměrně zasažené celé tělo). Toto je graf pro případ, že je ekvivalentní dávka rovnoměrně rozložená na celé tělo. Kdybychom chtěli znát účinky pouze na konkrétní orgán, museli bychom znát graf závislosti efektivní dávky pro daný orgán. Podrobnější popis například v [Hála, 1998, s. 145].

PE_D do 500 mSv
Zákonné limity

Z Obrázku 9 je patrné, že při nízké úrovni nelze zjistit žádné přímé škodlivé účinky ionizujícího záření na lidský organismus. Ty se projevují až při ekvivalentních dávkách převyšujících 500 mSv. V České republice je zákonem stanoven nejvyšší přípustný limit ozáření běžného obyvatele během jednoho roku ve výši 5 mSv. Ekvivalentní dávka záření z přírodních zdrojů je kolem 2,5...3 mSv za rok, umělé zdroje (včetně jaderných zařízení) přispívají ročně jen zcela minimálně asi 0,01 mSv.

Akutní nemoc z
ozáření

Při ekvivalentní dávce 1 až 2 Sv nastává akutní nemoc z ozáření (závisí na individuální odolnosti). Následuje několik fází onemocnění (nevolnost, skleslost, bolesti hlavy, zvracení a různé závažné změny v krevním obrazu podle stupně ozáření). Poté následuje latence a poté padání vlasů, silná vnímavost vůči infekcím. Při ozáření ekvivalentní dávkou 6 Sv převládá hematologická (hematologické změny tj. změny v krvetvorbě jsou popsány v [Garlík, 2012, s. 691]) forma nemoci pravděpodobnost přežití 20 %, při 10 Sv pravděpodobnost přežití se blíží k 0 %. Ozáření ekvivalentní dávkou 50 Sv způsobuje nervovou formu nemoci projevující se psychickou dezorientací a zmateností, křečemi a bezvědomím. Během několika hodin až dnů nastává smrt v důsledku oběhového kolapsu, zástavy dýchání a poruch mozku.

Radiační onkologie

I když má ionizující záření na organismus (lidský) negativní vliv, tak ho lze využít k ničení nádorových buněk, čímž se zabývá obor zvaný radiační onkologie.

Úlohy

Úloha 1:

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 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 dosadte svou vlastní hmotnost. Řešení úlohy je uvedeno v Příloze 1.

1: zadání: $\tau; m_{\text{Po}}; m_{\text{T}}; t_1; t_2$	odečet: $T_{1/2}$
2: odečet: $w_{\text{Ra}}; w_{\text{Ry}}$	výpočet: $M; n; R_0; \lambda; \Delta R; \varepsilon_{\alpha}; \varepsilon_{\gamma}; D_{\alpha}; D_{\gamma}; H_{\text{T}}$
3: odečet: $E_{\alpha}; E_{\gamma}$	4: odečet: τ
odečet: $N_{\text{A}}; m_{\text{u}}; A_{\text{r}}$	výpočet: $R_{\text{rok}}; A_{\text{rok}}^+; A_0^+$

Postup řešení Úlohy 1, popisek symbolů je v Příloze 1.

Odkazy

- ŠKORPÍK, Jiří, 2024, Jaderná energie a technologie pro její využití , *Transformační technologie*, Brno, ISSN 1804-8293, <https://www.transformacni-technologie.cz/jaderna-energie-a-technologie-pro-jeji-vyuziti.html>.
- ATKINS, P. W., 2005, *Periodické království: cesta do země chemických prvků*, Academia, Praha, ISBN 80-200-1185-4.
- BĚHOUNEK, František, 1945, *Svět nejmenších rozměrů*, Jaroslav Tožička, Praha.
- GARLÍK, Bohumír, 2012, Energie elektromagnetického pole, inteligentní budovy a lidský organismus, *Energetika*, 62(12), ČSZE, Praha, ISSN 0375–8842.
- 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.
- NĚSTĚRENKO, G., SOBOLEV, A., SUŠKOV, J., 1959, *Atomová letadla*, Naše vojsko, Praha. Z ruského originálu *Primenenije atomonych dvigatělej v aviaciji*.
- VOHLÍDAL, Jiří, JULÁK, Alois, ŠTULÍK, Karel, 1999, *Chemické a analytické tabulky*, Grada, Praha, ISBN 978-80-7169-855-5.
-