

Univerzita Palackého v Olomouci  
Přírodovědecká fakulta  
Katedra experimentální fyziky

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

## Fyzika a rizika radioaktivního odpadu



Autor:	Jindřich Hodinka
Studijní program:	B1701 Fyzika
Studijní obor:	1701R003 Fyzika se zaměřením na vzdělávání
Forma studia:	Prezenční
Vedoucí práce:	doc. RNDr. Roman Kubínek, CSc.
Termín odevzdání práce:	10. srpen 2015

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně pod vedením ..... a že jsem použil(a) zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých pramenů.

V Olomouci .....

.....

## Bibliografická identifikace:

Jméno a příjmení autora	Jindřich Hodinka
Název práce	Fyzika a rizika radioaktivního odpadu
Typ práce	Bakalářská
Pracoviště	Katedra experimentální fyziky
Vedoucí práce	doc. RNDr. Roman Kubínek, CSc.
Rok obhajoby práce	2015
Abstrakt	Práce se zabývá problematikou uskladnění vyhořelého jaderného paliva, riziky spojenými s jeho uskladněním. V této práci jsou vysvětleny základní pojmy z jaderné fyziky a dozimetrie. Cílem je, aby i laický čtenář získal představu o základních dozimetrických veličinách, měření radioaktivity i velikostech absorbovaných dávek v běžném prostředí, ve srovnání s povolenými dávkovými limity z umělých zdrojů ionizujícího záření.
Klíčová slova	Modely jádra atomu a původ radioaktivity, dozimetrické veličiny, umělé zdroje ionizujícího záření, přírodní zdroje ionizujícího záření, stochastické účinky, deterministické účinky, dozimetrické přístroje, radioaktivní odpad, hlubinné úložiště, přírodní analog
Počet stran	58
Počet příloh	1
Jazyk	Český

## Bibliographical identification:

Autor's first name and surname	Jindřich Hodinka
Title	Physics and Risks of Radioactive Waste
Type of thesis	Bachelor
Department	Department of Experimental Physics
Supervisor	doc. RNDr. Roman Kubínek, CSc.
The year of presentation	2015
Abstract	Thesis deals with the storage of spent nuclear fuel, the risks associated with its storage. In this paper explains the basic concepts of nuclear physics and dosimetry. The aim is that even a lay reader get an idea of the basic dosimetric quantities, measurements of radioactivity and sizes of absorbed doses in the normal environment, compared with the permissible dose constraints from artificial sources of ionizing radiation.
Keywords	Models of atomic nuclei and the origin of radioactivity, dosimetric variables, artificial ionizing radiation sources, natural sources of ionizing radiation, stochastic effects, deterministic effects, dosimetry equipment, radioactive waste deep repository natural analogue
Number of pages	58
Number of appendices	1
Language	Czech

# Obsah

Úvod.....	7
1 Modely jádra atomu a původ radioaktivity.....	8
1.1 Protonový model jádra.....	8
1.2 Proton – elektronový model jádra.....	8
1.3 Heisenbergův – Ivaněnkův model jádra.....	9
1.4 Kapkový model jádra atomu.....	10
1.5 Slupkový model jádra atomu.....	10
1.6 Radioaktivita.....	12
1.6.1 Rozpadový zákon.....	12
1.6.2 Druhy záření způsobené radioaktivitou jádra.....	13
2 Dozimetrie ionizujícího záření.....	15
2.1 Dozimetrické veličiny.....	15
2.2 Zdroje ionizujícího záření.....	18
2.2.1 Přírodní zdroje ionizujícího záření.....	18
2.2.2 Umělé zdroje ionizujícího záření.....	20
2.3 Účinky ionizujícího záření.....	22
2.3.1 Biologické účinky ionizujícího záření.....	22
2.3.2 Účinky záření podle velikosti dávky.....	22
2.4 Ochrana před zářením.....	27
2.4 Interakce $\gamma$ záření s látkou.....	29
2.5 Dozimetrické přístroje.....	30
2.5.1 Plynové dozimetry.....	30
2.5.2 Filmový dozimetr.....	33
2.5.3 Scintilační dozimetry.....	34
2.5.4 Polovodičové detektory.....	37
3 Vyhořelé jaderné palivo (VJP).....	39
3.1 Radioaktivní odpady.....	39
3.2 Jaderné reaktory v České republice.....	40
3.3 Obavy veřejnosti a ekologických organizací z rizik spojených se skladováním vyhořelého jaderného paliva.....	41
3.4 Přírodní analogy.....	46
3.4.1 Cigar lake.....	46
3.4.2 Oklo.....	47
3.4.3 Další přírodní analogy.....	48
3.5 Hlubinné úložiště v ČR.....	48
Závěr.....	51
Seznam zkratk.....	53
Seznam použitých pramenů.....	55
Příloha.....	57

## Úvod

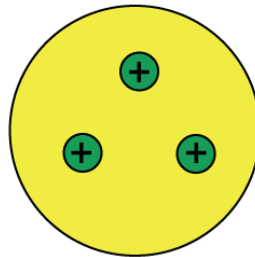
Fyzika ionizujícího záření s technickým rozvojem již překročila pozornost pouze úzké skupiny specializovaných odborníků. Poměrně široká veřejnost se zajímá o problematiku spojenou s ionizujícím zářením, protože se ukázalo, že radioaktivita může mít dopady na zdraví lidí i životní prostředí. Díky rozmachu informačních technologií je publikována na veřejnost celá řada článků a názorů o nebezpečích a rizicích radioaktivního záření. Mimo zajímavých a poučných článků jsou bohužel publikovány i texty, které jsou tendenční a poměrně iracionální. I když vědecká veřejnost publikovala řadu odborných publikací, týkajících se různých témat spojených s ionizujícím zářením, přesto veřejnost je těmito poznatky spíše nedotčena, protože jí chybí určitá průprava, která by umožnila pochopení těchto poznatků. Protože širší veřejnost nechápe povahu radioaktivity, lze se setkat mezi určitými skupinami s projevy strachu a nepřátelství vůči jaderné energetice. Proto je cílem této práce poskytnout laikovi obecný vhled na problematiku ionizujícího záření se zaměřením na dlouhodobé skladování vyhořelého jaderného paliva z reaktoru. Rozsah této práce neumožňuje, aby byly řešeny všechny problémy týkající se vyhořelého jaderného paliva, protože se jedná o komplexní problém, který se týká nejen přírodních zákonů, ale i životního prostředí, lidského zdraví, legislativy a ekonomie. V této práci bude čtenář seznámen s přírodními zákony, kterými se radioaktivní přeměny řídí a způsobem měření aktivity radionuklidů, možnými způsoby uskladnění radioaktivního odpadu z reaktoru. Ve stručnosti jsou zmíněny účinky ionizujícího záření na lidský organismus. V návaznosti na geografii se čtenář seznámí s tzv. přírodními analogy, které ukazují, jak si se skladováním radionuklidů poradila příroda bez lidského zásahu.

Pro pochopení podstaty radioaktivity z hlediska přírodních zákonů je důležité si uvědomit, jakým způsobem jsou uspořádány částice v jádře, proto se krátce a stručně zmíníme o některých modelech atomových jader. Tento přehled má vybudovat základní představu o historickém poznávání jádra atomu, dále zmínit na základě vybraných modelů důležité vlastnosti jader, které se pro nás stanou východiskem pro základní popis a objasnění radioaktivity. Protože není znám přesný analytický popis jaderných sil, je třeba vybrat model nejlépe vystihující fyzikální vlastnosti jádra atomu, které chceme popsat.

# 1 Modely jádra atomu a původ radioaktivity

## 1.1 Protonový model jádra

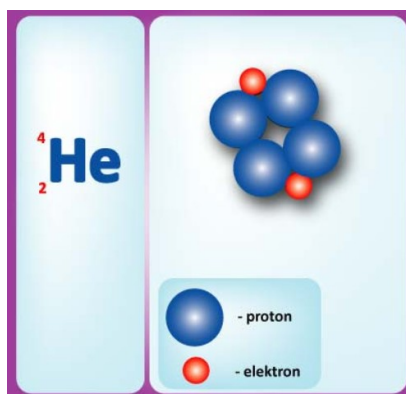
Nejstarším modelem atomového jádra je protonový model, který předpokládá, že atomové jádro se skládá pouze z protonů. Počet protonů (protonové číslo) se určí celkovým nábojem jádra. Tento model však měl několik slabých míst: „Fyzikové nedokázali objasnit stabilitu jádra sestávajícího pouze z protonů, protože protony s kladným nábojem „natěsnané“ uvnitř jádra se musejí výrazně odpuzovat díky coulombovské síle. Závažný rozpor byl ovšem zjištěn v případě hmotnosti jádra. Na základě protonového modelu se předpokládalo, že hmotnost jádra by měla být alespoň přibližně rovna součtu klidových hmotností protonů v jádře. Z experimentu bylo ovšem zjištěno, že pro lehká jádra, počínaje heliem platí, že hmotnost jádra je přibližně rovna dvojnásobku hmotnosti protonů v jádře.“ [1]



Obr. 1: Protonový model jádra atomu lithia [1]

## 1.2 Proton – elektronový model jádra

Tento model se pokusil vysvětlit vyšší skutečnou hmotnost jádra dvojnásobným počtem protonů, jejichž náboj je kompenzován elektrony přítomnými v jádře atomu. I u proton – elektronového modelu však stále přetrvávaly nepřesnosti, co se týče teoretické a experimentální hmotnosti jádra, u větších jader rozdíly hmotností narůstaly. Navíc přítomnost elektronů v jádře by způsobila velký magnetický moment jádra, který však nebyl naměřen.



Obr. 2: Proton- elektronový model jádra atomu helia [2]

### 1.3 Heisenbergův – Ivaněnkův model jádra

Po objevu neutronu J. Chadwickem roku 1932 vznikl tento model jádra. Jádro se skládá z protonů a neutronů, které se souhrnně označují jako nukleony. Počet protonů v jádře udává protonové číslo  $Z$ , počet nukleonů nukleonové číslo  $A$ . Pro počet neutronů v jádře  $N$  (neutronové číslo) platí:

$$N = A - Z. \quad (1.1)$$

Protonové číslo  $Z$  a nukleonové číslo  $A$  pro chemický prvek  $X$  zapíšeme jako  ${}^A_Z X$ .

Na základě rozdělení nukleonů v jádře na protony a neutrony můžeme definovat tyto pojmy:

*Prvek* je látka, jejíž atomová jádra mají stejné protonové číslo  $Z$ .

*Nuklid* je látka, jejíž atomová jádra mají stejné protonové číslo  $Z$  i nukleonové číslo  $A$ .

*Izotopy* jsou nuklidy, jejichž atomová jádra mají stejné protonové číslo  $Z$ , ale liší se nukleonovým číslem  $A$ .

*Izobary* jsou nuklidy, jejichž atomová jádra mají stejné nukleonové číslo  $A$ , ale liší se protonovým číslem  $Z$ .

Protony a neutrony jsou spolu vázány krátkodosahovými jadernými silami. Vazebná energie jádra  $E$  způsobuje hmotnostní úbytek jádra  $\Delta m$ , proto lze vazebnou energii jádra vyjádřit:

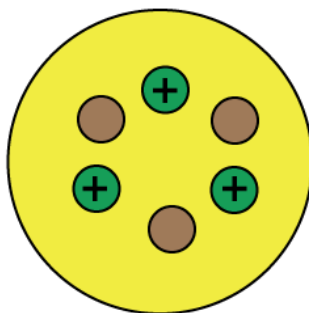
$$E = \Delta m c^2, \quad (1.2)$$

kde  $c$  je rychlost šíření světla ve vakuu. Hmotnostní úbytek  $\Delta m$  je roven:

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_j, \quad (1.3)$$

kde  $m_p$  je hmotnost protonu,  $Z$  je protonové číslo,  $m_n$  je hmotnost neutronu,  $N$  je neutronové číslo,  $m_j$  je celková hmotnost atomového jádra.

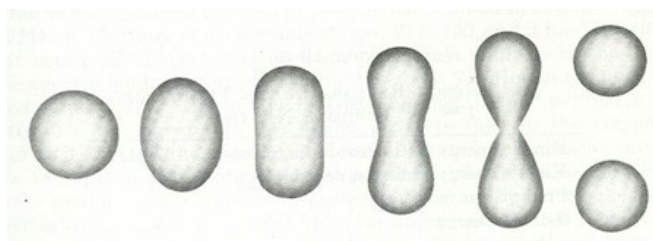




Obr. 3: Heisenbergův – Ivaněnkův model jádra atomu lithia [1]

### 1.4 Kapkový model jádra atomu

Roku 1937 byl vytvořen další model jádra atomu Nielsem Bohrem. Tento model vychází z představy, že nukleony v jádře se celkově chovají jako kapka nestlačitelné kapaliny, která v neexcitovaném stavu má tvar koule. Jakmile dojde k excitaci celého jádra (např. pohlcením neutronu), začne se jádro deformovat, až dojde k jeho rozštěpení.

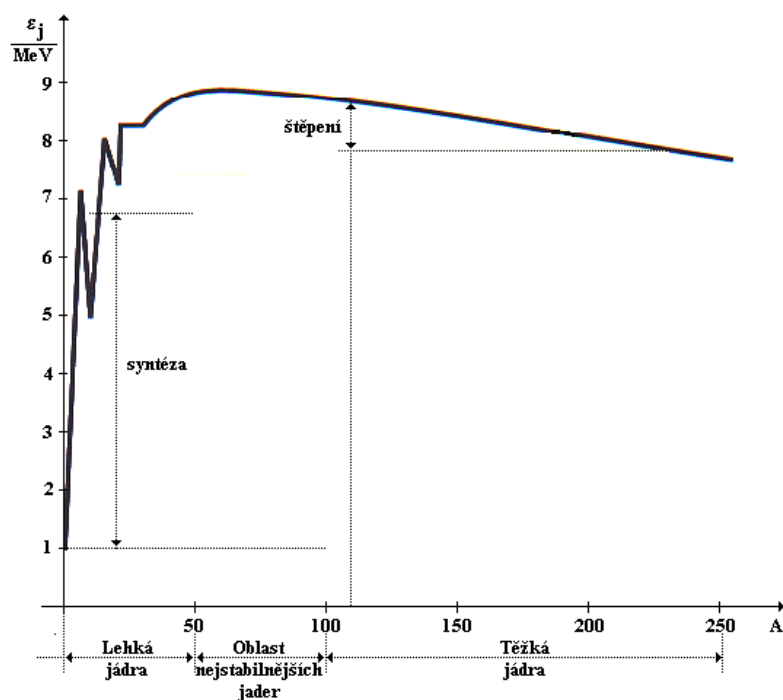


Obr. 4: Znárodnění štěpení jádra pomocí kapkového modelu [1]

### 1.5 Slupkový model jádra atomu

Slupkový model jádra atomu vychází z představy, že stejně jako elektrony atomového obalu i nukleony v jádře se mohou vyskytovat pouze v určitých energetických stavech (hladinách). Vysvětluje vysokou stabilitu jader atomů, jejichž jádra mají protonové resp. neutronové číslo rovno magickému číslu (2, 8, 20, 28, 50, 82 a 126) tím, že magické číslo odpovídá zaplněné energetické hladině protony nebo neutrony.

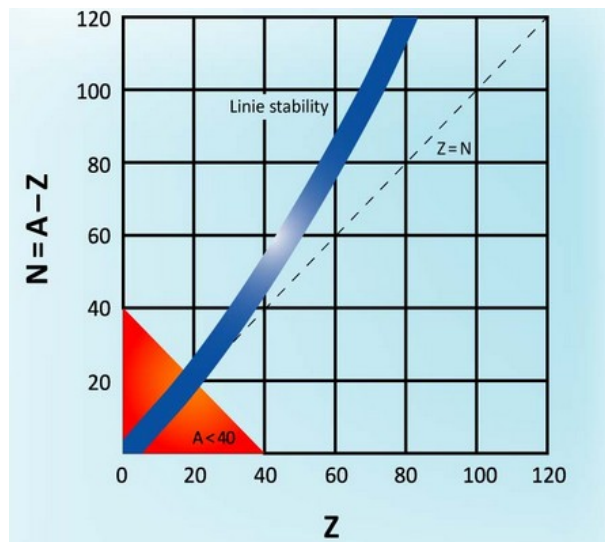
Nukleony se v jádře uspořádávají, aby vykazovaly co největší stabilitu, tzn. nukleony se budou uspořádávat tak, aby byly spolu vázány co největší vazebnou energií (resp. nejmenší, pokud vazebnou energii bereme jako zápornou). Pro každý nuklid nabývá vazebná energie jiných hodnot (viz rce 2). Jestliže vazebnou energii jádra daného nuklidu podělíme nukleonovým číslem  $A$ , dostaneme vazebnou energii připadající na jeden nukleon – separační energii  $\epsilon_j$ .



Obr. 5: Velikost separační energie  $\epsilon_j$  na nukleonovém čísle  $A$  [3]

Z grafu je patrné, že oblast nejstabilnějších jader atomů leží mezi 50 až 100 nukleony. To také vysvětluje, proč dochází k radioaktivním přeměnám radionuklidů – postupným vyzařováním částic se nuklidy dostávají do stabilnějších forem (s vyšší separační energií).

Slupkový model atomového jádra rovněž vysvětluje existenci linie stability. Linii stability získáme, pokud uspořádáme stabilní nuklidy podle protonových čísel  $Z$  a na nich závislých neutronových číslech  $N$ . Nuklidy, jejichž nukleonové číslo  $A < 40$  jsou stabilní, jestliže pro jejich protonové číslo  $Z$  a neutronové číslo  $N$  platí:  $Z = N$ . To je způsobeno tím, že nukleony podléhají Pauliho vylučovacímu principu, a proto může jednu energetickou hladinu obsadit pouze proton a neutron, jejichž spin je opačný. Jestliže je v jádře „nadbytek“ protonů resp. neutronů, tak „nadbytečné“ částice začnou obsazovat vyšší energetické hladiny. Pro nukleonové číslo  $A > 40$  převažuje u stabilních nuklidů počet neutronů nad protony, což je způsobeno tím, že s rostoucím protonovým číslem se začíná projevovat odpudivá coulombovská interakce, takže pro jádro je mírný přebytek neutronů energeticky výhodnější. Při radioaktivním záření se mění protonová resp. neutronová čísla radionuklidů, čímž se radionuklidy postupně mění na stabilní nuklidy, které se nacházejí na linii stability.



Obr. 6: Znázornění linie stability [2]

## 1.6 Radioaktivita

„Radioaktivita je jev, kdy dochází k samovolné vnitřní přeměně složení nebo energetického stavu atomových jader, přičemž je emitováno vysokoenergetické záření. Jádra vykazující tuto vlastnost se nazývají radionuklidy.“ [4]

Radioaktivní přeměny jsou procesy, které jsou nezávislé na vnějších fyzikálních podmínkách (např. tlak, teplota, vlhkost ...). Při radioaktivních přeměnách radionuklidů se uplatňuje rozpadový zákon, který stanovuje počet radionuklidů v závislosti na čase. Tento rozpadový zákon je statistické povahy, protože „radioaktivní přeměna jader je stochastický kvantově-mechanický jev, takže nelze nijak předpovědět čas, za něj se určité konkrétní jádro přemění.“ [4]

### 1.6.1 Rozpadový zákon

Rozpadový zákon vychází z pozorování, že poměr počtu částic na začátku  $N(t)$  a na konci  $N(t+\Delta t)$  nějakého časového intervalu  $\Delta t$  je roven konstantě:

$$k = \frac{N(t+\Delta t)}{N(t)} \quad (1.4)$$

Kvůli statistické povaze rozpadového zákona můžeme určit jen počet jader, která se rozpadnou za jednotku času – aktivitu  $A$

$$A(t) = -\frac{dN}{dt} \quad (1.5)$$

Z rovnic (1.4) a (1.5) vyplývá

$$\lambda N(t) = -\frac{dN}{dt}, \quad (1.6)$$

kde  $\lambda$  je rozpadová konstanta charakterizující rozpadový proces daného radionuklidu. Po integraci diferenciální rovnice dostaneme řešení

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad (1.7)$$

kde  $N(t)$  je počet nerozpadlých jader radionuklidu po uplynutí času  $t$ ,  $N_0$  je počet jader radionuklidu v čase  $t = 0$ . Protože platí, že počet částic  $N(t)$  je úměrný hmotnosti látky  $m(t)$ , můžeme psát rozpadový zákon ve tvaru

$$m(t) = m_0 e^{-\lambda t}. \quad (1.8)$$

Z rozpadového zákona lze vyjádřit počet rozpadlých jader  $N(r)$  za čas  $t$  jako

$$N(r) = N_0 (1 - e^{-\lambda t}). \quad (1.9)$$

Pro aktivitu radionuklidu  $A(t)$  platí

$$A(t) = \lambda N(t) = \lambda N_0 \cdot e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}, \quad (1.10)$$

kde  $A_0$  je aktivita radionuklidu v čase  $t = 0$ ,  $A(t)$  je aktivita vzorku po uplynutí doby  $t$ . Jednotkou aktivity  $A$  je Bq (bequerel). Aktivita 1 Bq znamená, že za 1 s došlo k rozpadu 1 jádra. Starší jednotkou aktivity je Ci (curie), pro kterou platí, že  $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$ . Dále je definován poločas rozpadu (přeměny)  $T$  jako doba, za kterou se přemění polovina jader radionuklidu

$$N(t) = \frac{N_0}{2}. \quad (1.11)$$

Dosazením výrazu (1.11) do vztahu (1.7) a úpravou dostaneme pro poločas rozpadu  $T$

$$T = \frac{\ln(2)}{\lambda}. \quad (1.12)$$

Dále je definována střední doba života  $\tau$  jako čas, za který klesne počet jader radionuklidu  $N(t)$  na hodnotu

$$N(t) = \frac{N_0}{e}. \quad (1.13)$$

Po dosazení vztahu (1.13) do vztahu (1.7) a úpravě dostaneme pro střední dobu života  $\tau$  výraz

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T}{\ln(2)}. \quad (1.14)$$

## 1.6.2 Druhy záření způsobeného radioaktivitou jádra

Rozlišujeme 3 základní druhy ionizujícího záření  $\alpha$  (alfa),  $\beta$  (beta),  $\gamma$  (gama). Podstatou záření  $\alpha$  je proud jader helia  ${}^4_2\text{He}$ . Radionuklid  $X$  rozpadající se vyzářením částice  $\alpha$  se přemění na (radio)nuklid  $Y$  podle schématu



Záření  $\beta$  rozlišujeme podle náboje vyzářené částice na  $\beta^+$  (proud pozitronů) a na  $\beta^-$  (proud elektronů). Radionuklid  $X$  vyzářující proud elektronů se rozpadá na (radio)nuklid  $Y$  podle schématu



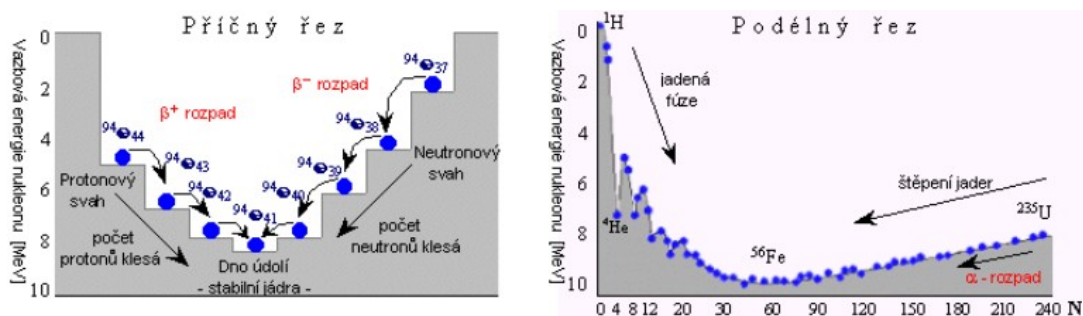
Radionuklid  $X$  vyzářující proud pozitronů se rozpadá na (radio)nuklid  $Y$  podle schématu



Záření  $\beta^+$  bylo pozorováno jen u uměle připravených látek [6].

Zářením  $\gamma$  se jádro v excitovaném (vzbuzeném) stavu zbavuje přebytečné energie vyzářením fotonu elektromagnetického záření. Tento druh záření zpravidla doprovází radioaktivní přeměny  $\alpha$  a  $\beta$ , protože často dochází k tomu, že nově vzniklý nuklid  $Y$  má po radioaktivní přeměně ještě přebytečnou energii, kterou vyzáří formou  $\gamma$  záření. Zářením  $\gamma$  na rozdíl od záření  $\alpha$  a  $\beta$  nenese žádný náboj. Vlnová délka  $\gamma$  záření je kratší než 300 pm [5].

Obecně platí, že radionuklidy s přebytkem protonů se rozpadají přeměnou  $\beta^+$ , aby se dostali na linii stability snížením počtu protonů v jádře, zatímco radionuklidy s přebytkem neutronů se na linii stability dostávají přeměnou  $\beta^-$ . Přeměny  $\alpha$  se odehrávají podél linie stability [2]. Odkaz na poznámku pod čarou by měl být jako horní index? Možná je to nějakou jinou verzí editoru, stejně jako ostatní mé poznámky. Pokud bychom vedli dva řezy linií stability, jeden v příčném, druhý v podélném směru, dostali bychom tzv. údolí stability. V příčném řezu by se nacházely na levém (Protonovém) břehu radionuklidy rozpadající se přeměnou  $\beta^+$ , na pravém (Neutronovém) břehu radionuklidy, které se rozpadají přeměnou  $\beta^-$ . V podélném řezu bychom dostali svah, který se svažuje směrem k místům s maximální vazebnou energií na jeden nukleon. Směrem k maximu vazebné energie by se radionuklidy dostávali přeměnou  $\alpha$ .



Obr. 7: Znázornění údolí stability [4]

## 2 Dozimetrie ionizujícího záření

„Dozimetrie ionizujícího záření je obor radiační fyziky, který se zabývá účinky záření na látku ve vztahu k druhům a vlastnostem interakce záření s látkou a k množství záření, pohlceném v látce (pohlcená energie - "dávka"). Studovanou látkou je především živá tkáň. Modelová měření dávek a dávkových příkonů se provádějí ve vodě, vzduchu a speciálních dozimetrických fantomech.“ [7] Abychom mohli účinky záření na organismus popsat, zavedeme dozimetrické veličiny.

### 2.1 Dozimetrické veličiny

#### Absorbovaná dávka (dávka)

Absorbovaná dávka  $D$  je základní dozimetrická veličina. Vyjadřuje množství pohlcené energie  $E$  nabitých částic na jednotku hmotnosti látky  $m$ , tedy

$$D = \frac{dE}{dm} . \quad (2.1)$$

Jednotkou absorbované dávky je J/kg. V dozimetrii se však používá jednotky Gy (Gray).

#### Dávkový příkon

Dávkový příkon  $D'$  je definován jako

$$D' = \frac{dD}{dt} , \quad (2.2)$$

což je přírůstek absorbované dávky  $D$  za časový interval  $dt$ . Jednotkou dávkového příkonu  $D'$  je Gy/s. V praxi se často užívají násobné hodnoty této jednotky, např. mGy/hod.

#### Kerma

Záření  $\gamma$  je proud nenabitých částic (fotonů) na které nelze vztahovat definici dávky. Proto byla zavedena veličina kerma  $K$ , popisující nepřímé ionizující účinky záření v látce. Kerma  $K$  je definována podobně jako absorbovaná dávka  $D$

$$K = \frac{dE}{dm} , \quad (2.3)$$

kde  $E$  je energie předaná nabitým částicím v látce (elektrony, protony) o hmotnosti  $m$ . Jestliže se sekundární záření plně absorbuje, platí  $K=D$ , když např. na povrchu látky část nabitých částic uniká z materiálu platí  $K>D$ . Pro záření gama o energii menší než 3 MeV hodnoty obou veličin (kermy a dávky) prakticky splývají [7]. U kermy je nutné uvést, ke kterému látkovému prostředí se vztahuje (např. vzduch, tkáň).

### Lineární přenos energie LET

Představuje střední energii  $E$  dodanou prolétávající částicí ionizujícího záření látkou, která je vztažena na dráhu částice  $dx$

$$L = \frac{dE}{dx} . \quad (2.4)$$

Má-li záření krátký dosah ( $\alpha$ ), je energie rozložena podél krátké dráhy, je-li záření delšího dosahu ( $\beta, \gamma$ ), pak je předaná energie rozložena po delší dráze. Jednotkou lineárního přenosu energie  $L$  je J/m. V praxi se používá jednotka keV/mm. V návaznosti na LET bývá zaváděna jako další veličina lineární ionizace, což je počet iontových párů (kationt, elektron) na dráhu ionizující částice. Dle lineární ionizace můžeme záření rozdělit na řídké ionizující ( $\beta, \gamma$ ) a na záření hustě ionizující ( $\alpha$ ). Záření řídké ionizující vytváří 100 iontových párů/mikrometr, záření hustě ionizující 2000 iontových párů/mikrometr. [7] Z hustoty lineární ionizace také vyplývá míra radiobiologických účinků na organismus. S rostoucí mírou koncentrace iontů podél dráhy částice narůstá pravděpodobnost interakce ionizované částice s okolními molekulami. Ionizace může mít za následek poškození DNA buňky.

### Dávkový ekvivalent (ekvivalentní dávka)

Dávkový ekvivalent  $H$  ve tkáni či orgánu je definován jako součin absorbované dávky  $D$  a jakostního faktoru  $Q$  (někdy označovaného jako RBE,  $w_R$ ). Rovnici zapisujeme ve tvaru

$$H = Q D . \quad (2.5)$$

Jakostní faktor  $Q$  (viz tabulka 1) udává, kolikrát je vyšší radiobiologická účinnost daného typu záření, než je účinnost záření  $\gamma$ . Jednotkou dávkového ekvivalentu je Sv (Sievert).

Tab. 1: *Jakostní faktor Q pro různé druhy záření [6]*

Druh záření	Q
$\gamma$	1
$\beta$ , $E > 30$ keV	1
$\beta$ , $E < 30$ keV	1,7
Rezonanční neutrony 0,5 eV – 1 keV	2,5
Tepelné neutrony	3
Neutrony se střední energií do 500 keV	8
Rychlé neutrony do 10 MeV	10
Protony a částice $\alpha$	10 – 13
Těžké ionty	20
Odražená jádra a štěpné fragmenty	20

### **Příkon dávkového ekvivalentu**

Příkon dávkového ekvivalentu  $H'$  je definován jako přírůstek dávkového ekvivalentu za časový interval  $dt$

$$H' = \frac{dH}{dt} . \quad (2.6)$$

Jednotkou je Sv/s.

### **Efektivní dávka (efektivní dávkový ekvivalent)**

Biologické účinky záření jsou dány nejen druhem záření, ale i charakterem zasažené části těla. Různé tkáně jsou jinak citlivé na ozáření ionizujícím zářením, a proto se zavádí veličina efektivní dávka  $H_E$ . Efektivní dávka pro daný orgán (tkáň) je definována jako součin dávkového ekvivalentu  $H$  a tkáňového váhového faktoru  $w_T$  (viz tabulka 2). Celkovou efektivní dávku dostaneme sumací členů zasažených orgánů. Proto můžeme pro efektivní dávku  $H_E$  psát

$$H_E = \sum_T w_T \cdot H_T . \quad (2.7)$$

Jednotkou je Sv. Pro tkáňový váhový faktor  $w_T$  musí platit

$$\sum w_T = 1 . \quad (2.8)$$



Tab. 2: *Tkáňové váhové faktory  $w_T$  pro různé tkáně (orgány)* [8]

Tkáň nebo orgán	$w_T$
Gonády	0,20
Červená kostní dřeň	0,12
Tlusté střevo	0,12
Plíce	0,12
Žaludek	0,12
Močový měchýř	0,05
Mléčná žláza	0,05
Játra	0,05
Jícen	0,05
Štítná žláza	0,05
Kůže	0,01
Povrchy kostí	0,01
Ostatní orgány a tkáně	0,05

## 2.2 Zdroje ionizujícího záření

Základním rozdělením zdrojů ionizujícího záření je podle vzniku na zdroje přírodní a umělé. Přírodní zdroje (rozpady radionuklidů, kosmické záření) jsou důsledkem přírodních procesů, umělé zdroje (radioaktivní odpad, rentgenové záření) vznikají činností člověka. Uvedeme srovnání mezi množstvím ionizujícího záření pocházejícího z přírody nebo z lidské činnosti, čímž získáme představu, jakým dávkám ionizujícího záření býváme běžně vystaveni.

### 2.2.1 Přírodní zdroje ionizujícího záření

Člověk je během svého života neustále vystavován přírodnímu ionizujícímu záření – při vdechování radioaktivních látek ze vzduchu, ozařováním radioaktivními prvky, které jsou součástí organismu, přijímá radioaktivní látky v potravinách, pohybem v lokalitách s různou mírou ozáření kosmickým a zemským ionizujícím zářením. Zdroje ionizujícího záření můžeme rozdělit na vnější (externí) a vnitřní (interní). Externí zdroj ionizujícího záření se nachází vně lidského těla, interní zdroj se nachází uvnitř těla. Radioaktivní látky se do těla dostávají dvěma cestami – vdechnutím (inhalací) nebo polknutím (ingescí).

Přírodní radionuklidy dělíme na terestrické a kosmogenní. Mezi terestrické radionuklidy (radionuklidy vyskytující se v půdě a v podložích) patří např.  $^{226}\text{Ra}$  (resp.

uran),  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ . Mezi kosmogenními radionuklidy (radionuklidy vzniklé díky ionizujícímu kosmickému záření) patří např.  $^{14}\text{C}$  nebo  $^3\text{H}$ . Velikosti průměrných ročních efektivních dávek ve světě jsou uvedeny v tabulce 3.

Tab. 3: Podíl jednotlivých složek přírodního záření ve světě [8]

Složka ozáření	Roční efektivní dávka (mSv)	
	Průměrná světová populace	Oblasti s extrémními hodnotami
Externí ozáření:		
- kosmické záření	0,38	2,0
- terestrální	0,46	4,3
Interní ozáření (bez radonu):		
- kosmogenní radionuklidy	0,01	0,01
- terestrální radionuklidy	0,23	0,6
Radon:		
- inhalace	1,2	> 10
- ingesce (podzemní voda)	0,005	0,1
Thoron	0,07	0,1
Celkem	2,4	

Jako thoron bývá označován izotop radonu  $^{220}\text{Rn}$ . Průměrný dávkový příkon ve světě, pocházející od terestrických (terestrálních) radionuklidů je  $0,057 \mu\text{Gy/h}$ . Extrémní hodnoty byly naměřeny např. ve Guarapari – Brazílie ( $50 \mu\text{Gy/h}$ ), Kerala – Indie ( $2 \mu\text{Gy/hod}$ ),

Ramsar – Irán ( $1 - 10 \mu\text{Gy/h}$ ). K přepočtu dávky na efektivní dávku pro výše uvedené terestrické radionuklidy (které vyzařují do vzduchového prostředí, vyzařují záření  $\gamma$ , pro  $2\pi$  geometrii) je používán konverzní faktor  $0,7 \text{ Sv/Gy}$ . [8]

Lidský organismus je dále vystaven internímu ozáření, které je způsobeno hlavně přijímáním potravy, která je kontaminována radionuklidy. Do rostlin se radionuklidy dostávají skrz kořenový systém, z kontaminované vody při zálivce, nebo také díky depozici radionuklidů z ovzduší. Přítomnost radionuklidů v produktech živočišné výroby je dána hlavně ingescí radionuklidů hospodářskými zvířaty. Referenční hodnoty měrné aktivity v jednotlivých částech potravinového řetězce jsou uspořádány v tabulce 4.

Tab. 4: Referenční hmotnostní aktivity přírodních radionuklidů v potravinách ve světě  
(m\*Bq/kg) [8]

Příjem	$^{238}\text{U}$ $^{234}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Pb}$	$^{210}\text{Po}$	$^{232}\text{Th}$	$^{228}\text{Ra}$	$^{228}\text{Th}$	$^{235}\text{U}$
Mléčné produkty	1	0,5	5	40	60	0,3	5	0,3	0,05
Maso	2	2,0	15	80	60	1,0	10	1,0	0,05
Obiloviny	20	10,0	80	100	100	3,0	60	3,0	1,0
Listová zelenina	20	20,0	50	30	30	15,0	40	15,0	1,0
Ovoce	3	0,5	30	25	30	0,5	20	0,5	0,1
Ryby	30	-	100	200	2000	-	-	-	-

Pro výpočet efektivní dávky při inhalaci nebo ingesci se používá pro každý radionuklid konverzní faktor (viz tabulka 5):

Tab. 5: Konverzní faktory pro přepočet příjmu vybraných přírodních radionuklidů inhalací  $h_{\text{inh}}$  a ingescí  $h_{\text{ing}}$  na úvazek efektivní dávky pro dospělého jedince [8]

Radionuklid	$h_{\text{inh}}$ ( $\mu\text{Sv/Bq}$ )	$h_{\text{ing}}$ ( $\mu\text{Sv/Bq}$ )
$^{238}\text{U}$	8,0	0,045
$^{234}\text{U}$	9,4	0,049
$^{235}\text{U}$	8,5	0,047
$^{226}\text{Ra}$	3,5	0,28
$^{228}\text{Ra}$	2,6	0,69
$^{232}\text{Th}$	25,0	0,23
$^{210}\text{Pb}$	1,1	0,69
$^{210}\text{Po}$	3,3	1,2

## 2.2.2 Umělé zdroje ionizujícího záření

Jestliže srovnáme míru ozáření z umělých zdrojů oproti přírodním zdrojům ionizujícího záření, je patrné, že na celkovém ozáření obyvatel se umělé zdroje ionizujícího záření podílejí z mnohem menší části. Vezměme průměrnou roční efektivní dávku jedince ze světové populace z přírodních zdrojů  $H_{\text{PZ}}$  záření 2,4 mSv a stanovme průměrné efektivní dávky pocházející z jednotlivých umělých zdrojů  $H_{\text{UZ}}$  za určitou dobu. Doba  $t$ , za kterou jedinec dostane z přírodních zdrojů záření stejnou efektivní dávku, jako z umělých zdrojů potom bude

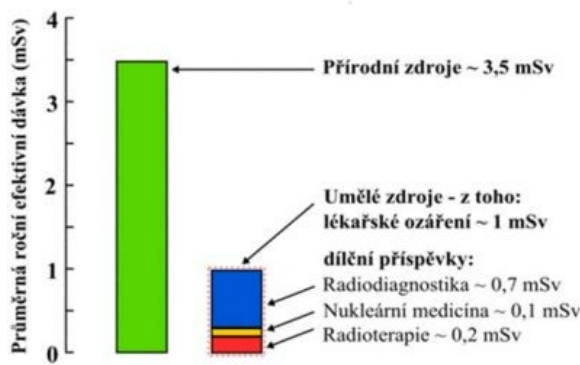
$$t = \frac{365 (\text{dní}) \cdot H_{UZ}}{H_{PZ}} \quad (2.9)$$

Výsledky srovnání efektivních dávek z umělých zdrojů  $H_{UZ}$  záření s průměrnou roční efektivní dávkou jedince ze světové populace z přírodních zdrojů  $H_{PZ}$  jsou uspořádány v tabulce 6.

Tab. 6: Ozáření z umělých zdrojů vyjádřené jako ekvivalentní období ozáření přírodními zdroji k roku 1993 [8]

Zdroj	Základ srovnání	Ekv. období ozáření z přírodních zdrojů
Lékařské ozáření	Rok praxe	90 dní
Zkoušky jaderných zbraní	Všechny dosud provedené	2,3 roku
Jaderná energetika (normální provoz)	Veškerá dosud, rok současného provozu	10 dní 1 den
Závažné havárie	Dosud nastavší	20 dní
Ozáření při práci	Rok současné praxe	8 hodin
Ozáření z přírodních zdrojů	Světový průměr	(1 rok)

V České republice je míra ozáření z přírodních zdrojů poněkud vyšší (viz obr. 8). Vyšší míra je dána geologickým podložím a výskytem terestrických radionuklidů v horninách, dále stravovacími návyky a s tím spojeným příjmem radionuklidů v potravinách, nebo nadmořskou výškou území.



Obr. 8: Průměrná roční efektivní dávka obyvatele ČR [9]

## **2.3 Účinky ionizujícího záření**

Je patrné, že ionizujícímu záření je vystaven každý člověk na světě. S rozvojem poznávání radioaktivního záření a medicíny se objevila otázka, jaké jsou účinky ionizujícího záření na lidský organismus.

### **2.3.1 Biologické účinky ionizujícího záření**

„Působení záření na živou hmotu se nejprve řídí obecnými zákony platnými i pro látky neživé. Dochází k ionizaci a excitaci, přičemž je absorbována energie. Na tento fyzikální proces navazuje řada dějů, podmíněných složitou organizací živé hmoty. Bylo zjištěno, že množství energie ionizujícího záření, potřebné např. k usmrcení jedince, je neobyčejně malé v porovnání s jinými druhy energie a tento nesoulad byl jedním z podnětů k vypracování různých teorií o účincích záření na živou hmotu.“ [10]

Při pohlcení ionizujícího záření živočišnou buňkou dochází k jejímu poškození, které se může projevit více způsoby. Jedním z účinků záření na živočišnou buňku je buněčná smrt. K té dochází již v klidovém období (období, kdy neprobíhá žádné buněčné dělení). Aby bylo dosaženo takového účinku, je potřebná poměrně vysoká dávka.

Pokud buňka dostane nižší dávku, která však již nevede k buněčné smrti, může být dalším účinkem ztráta schopnosti mitózy (schopnosti buněčného dělení). Z toho vyplývá, že pohlcená dávka bude mít vážnější biologické účinky pro tkáně, u kterých je buněčné dělení rychlejší než u ostatních tkání (např. krevetvorné orgány, výstelka střeva, vyvíjející se zárodek). [10]

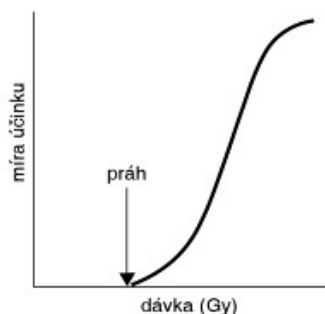
Někdy však absorbovaná dávka záření nevede ani ke ztrátě schopnosti mitózy u zasažené buňky, ale ke změně genetické informace v jádře buňky (mutaci). Citlivost buněk k poškozením a mutacím (radiosensitivita) je pro různé orgány a tkáně odlišná, proto se při stejných dávkách objevují u různých tkání různé biologické účinky. Podle rozsahu poškození genetické informace rozlišujeme mutace bodové, genové, chromozómové. Podle účinků záření dělíme na mutace gametické (zasahující zárodečné buňky v pohlavních žlázách, mutace se přenášejí do dalších generací) a mutace somatické (projevují se u ostatních tkání a orgánů zasaženého jedince, souvisí se vznikem rakoviny). [10]

### **2.3.2 Účinky záření podle velikosti dávky**

V závislosti na velikosti absorbované dávky rozdělujeme účinky záření na stochastické (náhodné) a deterministické (předurčené).

Stochastické účinky ionizujícího záření jsou způsobeny opakovanými malými dávkami, nebo obdržením podprahové dávky (nezpůsobující deterministické účinky). Lze

vypočítat pouze riziko újmy, pravděpodobnost, s jakou může újma nastat. S rostoucí dávkou narůstá riziko, přičemž teoreticky neexistuje žádná hodnota efektivní dávky, pro kterou by byla nulová pravděpodobnost stochastických účinků záření (viz obr. 9). Mezi stochastické účinky patří např. vyšší pravděpodobnost výskytu rakoviny nebo poškození genetické výbavy u potomstva.



Obr. 9: Míra stochastických účinků záření v závislosti na absorbované dávce [11]

Deterministické účinky záření se projevují po překročení prahové dávky (viz obr. 10) v krátkém čase. Příkladem deterministických účinků je akutní nemoc z ozáření, radiodermatitida (poškození pokožky – od vzniku pigmentu po odumírání pokožky), poškození fertility (plodnosti) nebo akutní lokální změny.



Obr. 10: Míra deterministických účinků v závislosti na absorbované dávce [11]

Při popisu zdravotních důsledků byly brány hodnoty absorbovaných dávek pro rentgenové záření. Rentgenové záření má přibližně stejné hodnoty vlnových délek jako záření  $\gamma$  (v řádech pikometrů) a stejně tak se jedná o proud fotonů, proto jsou biologické účinky rentgenového a  $\gamma$  záření prakticky stejné, tzn. že uvedené dávky rentgenového záření mají na organismus stejný zdravotní vliv jako  $\gamma$  záření.

Akutní nemoc z ozáření se začíná projevovat po dávkách od 1 Gy. Akutní nemoc z ozáření má několik podob, v závislosti na velikosti absorbované dávky. Krevní typ akutní

nemoci je způsoben obdržením dávky mezi 1 – 6 Gy. V důsledku ionizačního záření poklesne počet červených krvinek, bílých krvinek i krevních destiček. Akutní nemoc z ozáření krevního typu je provázena nevolností, skleslostí a zvracením. Tyto projevy jsou způsobeny poškozením imunitního a hormonálního systému. Po časných projevech následuje období latence, které trvá přibližně 1 – 2 týdny, a které není doprovázeno žádnými výraznými příznaky. Po období latence přichází vlastní nemoc z ozáření. Postižený trpí sepsí (otravou krve v důsledku zamoření těla bakteriemi), kterou doprovází teploty, krvácení do kůže a krvácení z dásní, trpí nechutenstvím a průjmami. Po 6 – 8 týdnech (v závislosti na velikosti obdržené dávky) dochází ke zotavování organismu, protože je postupně doplňován počet krvinek ze zachovalých ze zachovalých částí krevní dřeně. Jestliže je velikost absorbované dávky mezi 6 – 10 Gy, je průběh akutní nemoci z ozáření krevního typu bouřlivější a jestliže postižený nedostane odbornou pomoc, dochází k úmrtí do 20 – 30 dní. [10]

Akutní nemoc z ozáření střevního typu je způsobena obdržením dávek kolem 10 Gy a více. Dochází k odumření buněk střevní výstelky, které jsou odolnější vůči ionizujícímu záření, ale doba jejich života je 4 – 6 dní. Právě po uplynutí této doby dochází k projevům vlastní nemoci z ozáření střevního typu doprovázeném krvavými průjmy, špatným hospodařením těla s minerálními látkami a tekutinami, obnažením vnitřního povrchu střeva. Pokud postižený přežije 7 – 10 dní, projeví se rovněž akutní nemoc z ozáření krevního typu. [10]

Akutní nemoc z ozáření nervové formy nastává po obdržení dávek v řádu desítek Gy. Dochází k poškození buněk nervové soustavy, které jsou vůči ionizujícímu záření nejodolnější. Příznaky jsou dezorientace, zmatenost, porucha koordinace pohybů, křeče, hluboké bezvědomí. Smrt nastává v průběhu několika hodin až dní. [10]

Dalšími důležitým projevem deterministických účinků záření, který je třeba zmínit, jsou akutní lokální změny. Po obdržení dávky mezi 3 – 10 Gy dochází ke vzniku akutní radiační dermatitidy prvního stupně. Po 10 – 15 dnech se na pokožce postiženého objeví pozdní erytém (bolestivá, zarudlá, zduřelá skvrna). Akutní radiační dermatitida je navíc provázena ztrátou ochlupení, od 6 Gy může být ztráta ochlupení trvalá. [10]

Po obdržení dávky vyšší jak 10 Gy dochází ke vzniku akutní radiační dermatitidy druhého stupně. Na pokožce se objevují puchýře, které po zasažení infekcí způsobují další komplikace. V lepším případě se pokožka začne obnovovat po 2 – 4 týdnech v místech okraje defektu. Jestliže však byly vážněji zasaženy cévy, které vyživují tkáň, dochází k odumírání tkáně a ke vzniku vředu, což je projev radiační dermatitidy třetího stupně.

Jestliže dochází ke zhoršování stavu, musí dojít k chirurgickému odstranění vředu. [10]

Dalšími lokálními poškozeními může být např. poškození fertility (plodnosti) při zasažení pohlavních orgánů ionizujícím zářením. Ke sterilitě u mužů dojde po obdržení dávky 3 – 8 Gy, u žen dojde k trvalé sterilitě obdržením dávky 3 Gy. [10] Pro představu uveďme přehled účinků ionizujícího záření při obdržení celotělové dávky ve srovnání s povolenými limity a dávkami obdrženými z přírodních zdrojů (viz tabulka 7).



Tab. 7: Účinky ionizujícího záření v závislosti na velikosti obdržené celotělové dávky [12]

2 mSv/rok	Typické přírodní pozadí, liší se v různých zemích. (Např. Austrálie – 1,5 mSv, Severní Amerika 3 mSv).
1,5 do 2,0 mSv/rok	Průměrná dávka pro horníka v australských uranových dolech
2,4 mSv/rok	Průměrná dávka zaměstnance v jaderném průmyslu v USA.
nad 5 mSv/rok	Expozice člena posádky letů ve středních zeměpisných šířkách.
9 mSv/rok	Expozice člena posádky na letu New York – Tokyo přes severní pól.
10 mSv/rok	Maximální dávka pro horníka v australských uranových dolech.
20 mSv/rok	Průměrný současný limit pro zaměstnance v jaderné energetice a horníky v uranových dolech
50 mSv	Přípustná krátkodobá povolená dávka pro záchranáře (IAEA).
100 mSv/rok	Nejnižší úroveň ozáření, od níž lze odvozovat zvýšenou pravděpodobnost onemocnění rakovinou (UNSCEAR).
130 mSv/rok	Dlouhodobá dávka na obyvatele po radiční nehodě, měřeno 1 m nad úrovní kontaminované půdy. Rizika jsou příliš nízká, aby došlo k jakémukoliv zásahu pod tímto limitem.(IAEA)
170 mSv/týden	Krátkodobý bezpečnostní limit na obyvatele po radiční nehodě (IAEA).
250 mSv/rok	Dávka z přírodního pozadí v Iránu, bez zjištěných účinků na zdraví. (Některé dávky dosahují až 700 mSv/rok).
250 mSv	Povolená krátkodobá dávka pro zaměstnance Fukušimy v době havárie v březnu 2011.
350 mSv/celoživotně	Kritérium pro přemístění obyvatel po havárii v Černobylu.
500 mSv	Přípustná krátkodobá dávka pro záchranáře při záchraně lidských životů (IAEA).
700 mSv/rok	Dávkový limit pro nařízení evakuace po radiční havárii (IAEA uvádí krátkodobý limit 880 mSv/rok po dobu cca 1 měsíce jako prozatímně bezpečné).
800 mSv/rok	Nejvyšší naměřená dávka pocházející z přírodních zdrojů (pláž v Brazílii).
1 000 mSv jednorázově	Pravděpodobně způsobí po několika letech rakovinu u 5 % lidí ozářených touto dávkou. (To znamená, že je-li normální pravděpodobnost onemocnění rakovinou 25 %, tato dávka ji zvýší na 30 %).
1 000 mSv jednorázově	Práh pro akutní nemoc z ozáření. Způsobí dočasnou nevolnost, pokles počtu bílých krvinek, nikoliv však smrt. Nad tuto úroveň vážnost stavu roste úměrně zvyšující se dávkou.
5 000 mSv jednorázově	Může do měsíce usmrtit polovinu ozářených touto dávkou.
10 000 mSv jednorázově	Smrt nastane do několika týdnů.

## 2.4 Ochrana před zářením

Ochrana před zářením může být realizována třemi způsoby: časem, stíněním a polohou. Uvažujme bodový zdroj fotonového ionizujícího záření  $\gamma$ , který má aktivitu  $A$ , nachází se ve vzduchu nebo ve vakuu a není stíněn žádným materiálem. Při rozpadu se záření bude šířit do prostorového úhlu  $4\pi$ . S rostoucí vzdáleností  $r$  od bodového zdroje klesá také intenzita záření  $I$ , protože energie šířící se formou záření se rozděluje na sféru o ploše  $S = 4\pi r^2$ . Proto velikost intenzity  $I$  záření emitovaného bodovým zdrojem aktivity  $A$  ve vzdálenosti  $r$  je

$$I = \frac{A}{4\pi r^2} . \quad (2.10)$$

Energie záření  $W$  uvolněná za jednotku času  $t = 1$  s je dána jako

$$W = A E , \quad (2.11)$$

kde  $E$  je střední energie záření  $\gamma$  emitovaná daným radionuklidem,  $A$  je aktivita zářiče. Běžně používanou jednotkou energie  $E$  pro záření  $\gamma$  je eV, pro kterou platí převodní vztah

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} . \quad (2.12)$$

Protože pro  $E < 3$  MeV, jsou v látce absorbovány prakticky všechny nabitě částice uvolněné ionizujícím  $\gamma$  zářením [7], platí že

$$K = D . \quad (2.13)$$

Pro velikost absorbované dávky ionizujícího záření v látce dostaneme

$$D = \frac{A E \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{4\pi r^2} \cdot t , \quad (2.14)$$

kde  $E$  je střední energie záření v eV,  $A$  je aktivita zářiče,  $r$  je vzdálenost od zářiče,  $t$  je doba expozice látky. V praxi se zavádí gama konstanta  $\Gamma$ , která je pro každý radionuklid dána jako

$$\Gamma = \frac{E \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{4\pi} . \quad (2.15)$$

Základní jednotkou je ( $\text{Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ), častěji se však užívá odvozená jednotka ( $\text{mGy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{GBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ). Pomocí gama konstanty  $\Gamma$  můžeme potom psát pro velikost absorbované dávky

$$D = \frac{\Gamma A}{r^2} t . \quad (2.16)$$

Ze vztahu (2.16) vyplývá, že velikost absorbované dávky  $D$  klesá s druhou mocninou vzdálenosti  $r$  od zářiče, zároveň je dávka  $D$  přímo úměrná době expozice ozařované látky. Tohoto poznatku je využíváno v radiační ochraně.

Dalším způsobem radiační ochrany je stínění zdroje záření. Provedme úvahu, jak se změní počet detekovaných částic, jestliže mezi zářič a detektor vložíme vrstvu stínícího (terčového) materiálu. Zavedme počet fotonů  $J_0$  procházejících jednotkovou plochou  $S$  za jednotku času  $t$  bez stínění, počet fotonů  $J$  procházejících jednotkovou plochou  $S$  za jednotku času  $t$  se stíněním. Pro zeslabený svazek ionizujícího  $\gamma$  záření  $J$  potom platí absorpční zákon

$$J = J_0 e^{-\mu \cdot d}, \quad (2.16)$$

kde  $\mu$  je součinitel lineárního zeslabení pro  $\gamma$  záření (základní jednotka je  $\text{m}^{-1}$ ),  $d$  je šířka vrstvy stínícího materiálu. Vzorec platí pro úzký svazek záření. Namísto lineárního součinitele zeslabení  $\mu$  lze použít hmotnostní součinitel zeslabení  $\mu_m$ , pro který platí

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}, \quad (2.17)$$

kde  $\rho$  je hustota stínícího materiálu. Jednotkou hmotnostního součinitele zeslabení  $\mu_m$  je  $\text{kg}/\text{m}^2$ . Hodnoty hmotnostního součinitele zeslabení  $\mu_m$  závisí na energii záření ionizujícího  $\gamma$  záření. S rostoucí energií záření  $\gamma$  klesá hodnota zeslabení  $\mu_m$  pro daný materiál. Pomocí hmotnostního součinitele zeslabení  $\mu_m$  můžeme psát absorpční zákon ve tvaru

$$J = J_0 e^{-\mu_m \cdot m_s}, \quad (2.18)$$

kde  $m_s = \rho d$  je plošná hmotnost absorpčního prostředí. Jestliže dochází v důsledku stínění k poklesu proudu ionizačních částic  $J$ , potom klesá i absorbovaná dávka  $D$ . Proto podle absorpčního zákona můžeme psát pro velikost dávky  $D$  přijaté ze stíněného zdroje úzkého svazku ionizujícího záření

$$D = D_0 e^{-\mu_m \cdot m_s}, \quad (2.19)$$

kde  $D_0$  je dávka, kterou by exponovaný objekt obdržel od nestíněného úzkého svazku ionizujícího záření.

V souvislosti se stíněním záření je zaváděna polotloušťka  $d_{1/2}$

$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}, \quad (2.20)$$

jako tloušťka daného materiálu potřebného k tomu, aby se počet detekovaných částic snížil

na polovinu. Jestliže chceme dosáhnout zeslabení  $k = \frac{J_0}{J}$  pro svazek ionizujícího záření, potom pro počet polovrstev  $n$  platí

$$n = \frac{\log k}{\log 2}, \quad (2.21)$$

Analogicky jako polotloušťka  $d_{1/2}$  je zaváděna hmotnostní polotloušťka  $m_{1/2}$

$$m_{1/2} = \rho \frac{\ln 2}{\mu}, \quad (2.22)$$

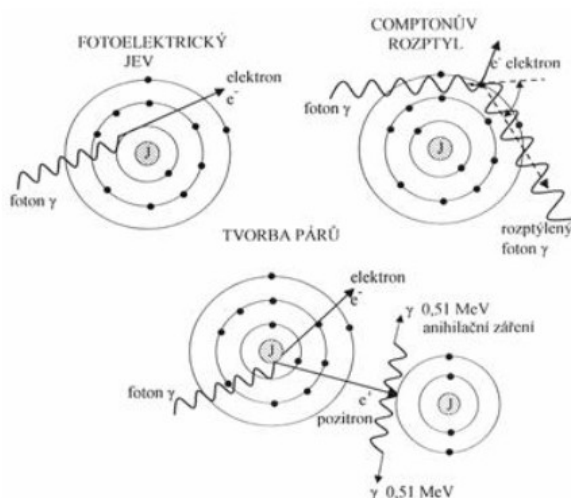
kde  $\rho$  je hustota materiálu.

## 2.4 Interakce $\gamma$ záření s látkou

Zeslabení  $\gamma$  záření při interakci s látkou je způsobeno fotoefektem, Comptonovým rozptylem a tvorbou elektron – pozitronových párů.

Při fotoefektu předá foton  $\gamma$  záření veškerou svou energii elektronu vázanému ve vnitřních slupkách atomu. Jakmile se elektron uvolní, jeho energetická hladina je obsazena elektronem z vyšší energetické hladiny, přičemž dojde k vyzáření fotonu charakteristického rentgenového záření. Pravděpodobnost fotoefektu narůstá s protonovým (atomovým) číslem a klesá s rostoucí velikostí energie  $\gamma$  záření, proto se fotoefekt projevuje u záření s nižší energií a u ozářených materiálů s vyšším protonovým číslem (např. olovo) [13].

Při Comptonově rozptylu dochází k interakci fotonu záření se slaběji vázaným elektronem na vyšších energetických hladinách (např. ve valenční vrstvě). Foton předá pouze část své energie elektronu, který se uvolní. Foton následně pokračuje s nižší energií a v odlišném směru. Comptonův rozptyl převládá u záření středních energií a u materiálů s nižším protonovým číslem (např. tkáň, voda). [13] Při tvorbě elektro – pozitronových párů je foton záření zcela pohlcen jádrem atomu absorpčního materiálu, za vzniku elektronu a pozitronu. Ke tvorbě elektron – pozitronového páru může dojít pouze za předpokladu, že minimální energie fotonu je 1,022 MeV. [13]



Obr. 11: Druhy interakce  $\gamma$  záření s látkou [13]

## 2.5 Dozimetrické přístroje

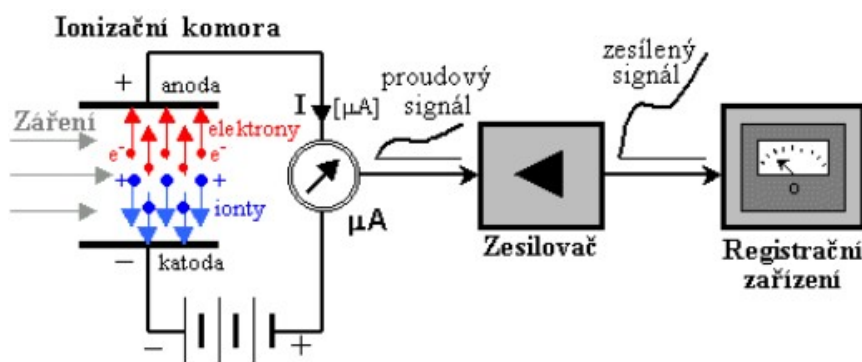
Dozimetrické přístroje slouží k měření radiometrických veličin. Jednotlivé druhy dozimetrů pracují s rozdílnými rozsahy energií a druhy záření. Rozlišujeme několik druhů dozimetrů, které pracují na odlišném fyzikálním principu. Základní druhy dozimetrů jsou: plynové dozimetry, filmové dozimetry, scintilační dozimetry, polovodičové dozimetry.

### 2.5.1 Plynové dozimetry

Plynové dozimetry využívají izolačních vlastností plynů, plyny tedy za běžných okolností nevedou elektrický proud. Jestliže však neutrální molekula plynu interaguje s částicí ionizujícího záření (alfa, beta, gama), která má dostatečnou energii, dojde k ionizaci dané molekuly, tj. k oddělení elektronu z elektronového obalu atomu. Tato částice postupně, v závislosti na své energii, vytváří iontové páry, dokud nepředá tolik své energie, že nemůže způsobit další ionizaci. Ionizační komora naplněná plynem je napojena na vnější napětí, které vytváří elektrické pole. Ionizované částice jsou zachyceny na elektrodu, která je připojena k detektoru počítače [14] (viz obr. 12).

Plynové detektory se rozdělují podle geometrie (tj. podle tvaru a uspořádání elektrod) a také se rozdělují podle oblastí pracovních napětí na elektrodách (viz obr. 14). Graf znázorňuje počet sebraných (detekovaných) iontů na elektrodách plynových detektorů v závislosti na velikosti napětí na elektrodách. Křivku můžeme rozdělit do několika oblastí.

V oblasti Ohmova zákona je elektrostatické pole vytvořené elektrodami nedostatečně velké, proto nedojde k dostatečně rychlému oddělení produktů ionizace, což má za následek rekombinaci (opětovné navázání iontů).



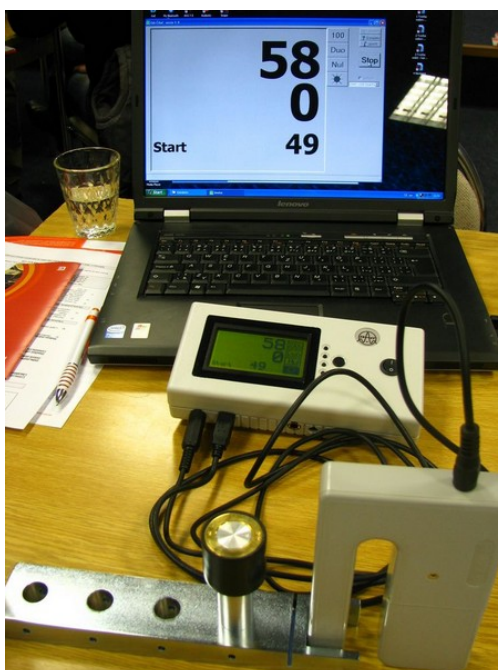
Obr. 12: Schématické znázornění principu plynových detektorů [15]

rostoucím napětím pravděpodobnost rekombinace klesá a po dosažení určité hodnoty napětí se přestává uplatňovat. Tato část křivky se nazývá oblast nasyceného proudu. Počet

zachycených iontů na elektrodách je roven počtu částic ionizovaných zachycenou ionizující částicí. Protože je počet iontů dán energií částice zachyceného záření, přičemž je známa energie potřebná na vytvoření jednoho iontového páru, můžeme určit energii dopadajícího záření (počet iontů dopadajících na elektrody zjistíme z naměřeného elektrického proudu mezi elektrodami). Velikost naměřeného elektrického impulsu je tedy úměrná energii zachycené částice ionizujícího záření. V této oblasti pracují **běžné ionizační komory**.

Při dalším zvyšování napětí na elektrodách dochází ke zvýšení počtu sebraných (detekovaných) iontů, a to v důsledku sekundární ionizace. Napětí na elektrodách urychlí ionty vzniklé při primární ionizaci natolik, že mají dostatečnou energii k vytváření nových iontových párů nárazem. Každý plyn má pro dané napětí definováno plynové zesílení, udávající poměr mezi velikostí vybuzeného zesíleného proudu a velikostí proudu způsobeného pouze primární ionizací (nárazem částice detekovaného záření). V této části křivky pracují **proporcionální detektory**. Využívají se pro detekci a spektrometrii (měření energie částic ionizujícího záření) částic, které mají příliš malou energii k tomu, aby dokázaly vybudit signál o dostatečné amplitudě. Používá se pro detekci nízkoenergetického fotonového záření i k detekci neutronů.

Po dalším zvyšování napětí se dostáváme do oblasti křivky ve které pracují **Geiger – Müllery detektory** (GM detektory). V této oblasti s rostoucím napětím prakticky vůbec nenarůstá počet iontů sebraných na elektrodách. Naměřený počet iontů (velikost elektrického proudu) není ovlivněn energií částice ionizujícího záření dopadající do detektoru, částice s jakoukoliv energií, při tomto napětí na elektrodách, vybudí stejnou amplitudu elektrického impulsu. Ionty vzniklé primární ionizací mají tak vysokou energii, že při nárazech neutrální molekuly plynu nejen ionizují, ale i způsobují excitaci vzniklých iontů. Ionty při přechodu do základního (neexcitovaného) stavu vyzařují fotony, které se šíří všemi směry. Fotony při dopadu na katodu mohou způsobit uvolnění fotoelektronů, čímž se prodlužuje doba trvání výboje. Výboj způsobený detekcí ionizující částice je ale potřeba co nejrychleji přerušit, protože během doby trvání elektrického impulsu je přístroj necitlivý, takže nezaregistruje další částice detekovaného záření (doba, během které je přístroj necitlivý se nazývá mrtvá doba, u GM detektorů je řádově  $10^{-4}$  s). Z tohoto důvodu se do GM detektoru přidává zhasací směs, která pohlcuje fotony, které by způsobily prodloužení doby impulsu. Moderní GM detektory již nepoužívají ke zhasení zhasací směs, ale ukončení impulsu je zajištěno vnějšími elektrickými obvody.



Obr. 13: GM detektor [16]

Při dalším zvýšení napětí dochází k zapálení samovolného koronového výboje, který nezávisí na tom, zda došlo nebo nedošlo k primární ionizaci v detektoru. Přístroje pracující na tomto principu se nazývají **koronové detektory**. Elektron, vzniklý ionizací plynové náplně, např. fotony sice způsobí lavinový efekt, ten je však kvůli vysokému šumu koronového výboje neměřitelný. Situace se změní, jestliže detektor přijme silně ionizující částici (např. štěpné fragmenty, částice alfa). Částice s takto vysokými ionizačními účinky vytvoří takový počet iontových párů, že v obvodu počítače je detekován impuls mnohem výraznější amplitudy než šum. Koronové detektory také slouží k detekci neutronů. Aby detekce neutronů byla možná, je na vnitřním povrchu katody umístěn prvek, který reaguje s neutrony. Touto reakcí dojde k vytvoření štěpného fragmentu se silnými ionizačními účinky, který způsobí vznik dostatečně velkého, měřitelného impulsu. Měření toku neutronů nezávisle na záblescích gama záření našlo dobré uplatnění v reaktorové fyzice [14] [15] [17]

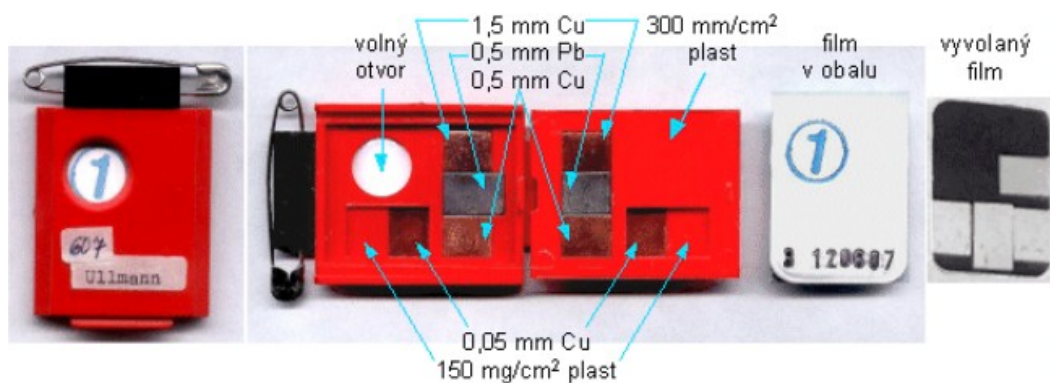


Obr. 14: Pracovní oblasti plynových detektorů [18]

### 2.5.2 Filmový dozimetr

Je to nejstarší prostředek používaný k zaznamenávání ionizujícího záření (od 19. století). Filmový dozimetr dokáže rozlišit typ, energii a směr dopadajícího záření. Dozimetrický film je umístěn v kazetě v papírovém obalu. Pro různé druhy záření (tepelné neutrony, fotony vyšších energií, beta, rentgenové záření) se používají různé druhy filtrů o přesně daných tloušťkách (např. plastik, sendvič olova s cínem, měď nebo i prázdné okno). Interakce nabitých částic s fotoemulzí (halogenid stříbra) způsobí zčernání (vyloučení částice stříbra), které je dobře patrné až po vyvolání filmu (po ponoření do vývojky a vyvolání se vyloučí stříbro v širším okolí částice, takže se stopa zvětší a zviditelní). Částice bez náboje zčernání nezpůsobí, ale mohou být detekovány díky sekundární ionizaci molekul papírového obalu nebo želatiny. Podle míry zčernání (optické hustoty) lze určit velikost obdržené dávky. Jestliže sledujeme celkové zčernání filmu nebo jeho část, můžeme určit intenzitu dopadajícího záření. Při mikroskopickém sledování vyloučených krystalků stříbra můžeme určit dráhu a úhel dopadajícího ionizujícího záření [15] [19].

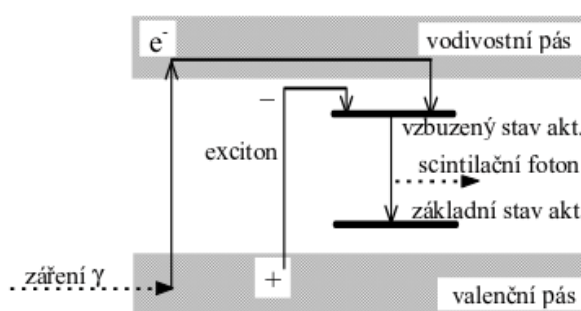




Obr. 15: *Filmový dozimetr* [15]

### 2.5.3 Scintilační dozimetry

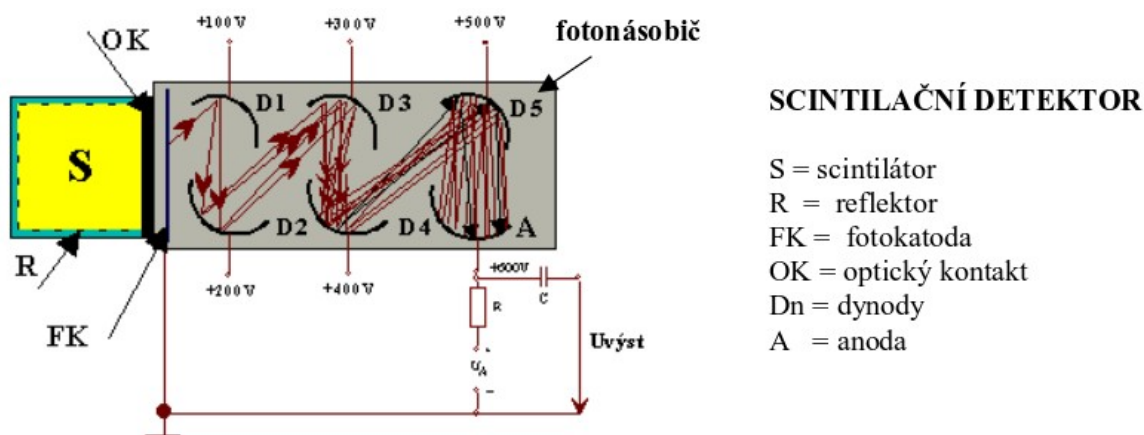
Scintilační látka anorganického scintilátoru se nejčastěji skládá z alkalických kovů (NaI, LiI) a příměsí (aktivátoru, např. Tl). Scintilační látkou mohou být i organické materiály (např. antracen, naftalín). Scintilační dozimetry pracují na principu luminiscence. Scintilační látka je ozářena ionizujícím zářením, což způsobí přechod elektronů z valenčního pásu do zakázaného pásu v excitovaném stavu. Elektrony se mohou dostat do zakázaného pásu právě díky přítomnosti aktivátoru, který narušuje krystalickou strukturu alkalického kovu. V zakázaném pásu zůstanou elektrony v energetické pasti, protože na svou základní energetickou hladinu se samovolně nemohou vrátit. Přechod elektronů do základního pásu (deexcitace) může nastat pouze v případě, že „uvězněným“ elektronům je dodána energie formou světla nebo tepla. Při přechodu elektronu z excitovaného do základního stavu je vyzářen scintilační foton, jehož energie odpovídá rozdílu energetických hladin, což můžeme pozorovat i jako viditelný záblesk (scintilaci).



Obr. 16: *Mechanismus luminiscence* [20]

Scintilační foton se ale může šířit všemi směry. Proto je scintilační látka obklopena reflektorem, který scintilační foton odrazí na místo optického kontaktu. Optický kontakt je vyplněn látkou, která má blízký index lomu jak pro fotokatodu, tak pro scintilační látku. Pokud by optický kontakt byl bez výplně, velký rozdíl mezi indexy lomu fotokatody a

scintilační látky, pak by docházelo k odrazu scintilačních fotonů na hranici optického prostředí, což by mělo za následek snížení účinnosti fotonů na fotokatodu. Za optickým kontaktem je umístěna fotokatoda. Při nárazu scintilačního fotonu na fotokatodu dojde k uvolnění fotoelektronu. Fotoelektrony z fotokatody jsou urychlovány a fokusovány elektrickým polem na dynodu. Povrch dynody je pokryt materiálem, ze kterého se po nárazu primárního fotoelektronu snadno uvolňují sekundární fotoelektrony. Sekundární fotoelektrony jsou opět elektrickým polem urychleny a fokusovány na další dynodu, na které se proces opakuje. Takto po několika zesíleních svazku elektronů na dynodách elektrony dopadají na anodu fotonásobiče. Kontakt elektronového svazku na anodě způsobí napěťový impuls, který vyhodnocujeme [21].



Obr. 17: Schéma scintilačního detektoru [21]

Vyhodnocování energetického spektra stěžuje fakt, že zachycené impulsy nezachycují přímo energetické spektrum dopadajícího záření, ale zaznamenávají energetické spektrum interakcí ionizujícího záření se scintilační látkou – fotoefekt, Comptonův rozptyl a elektron – pozitronovou anihilaci (tzv. přístrojové spektrum).

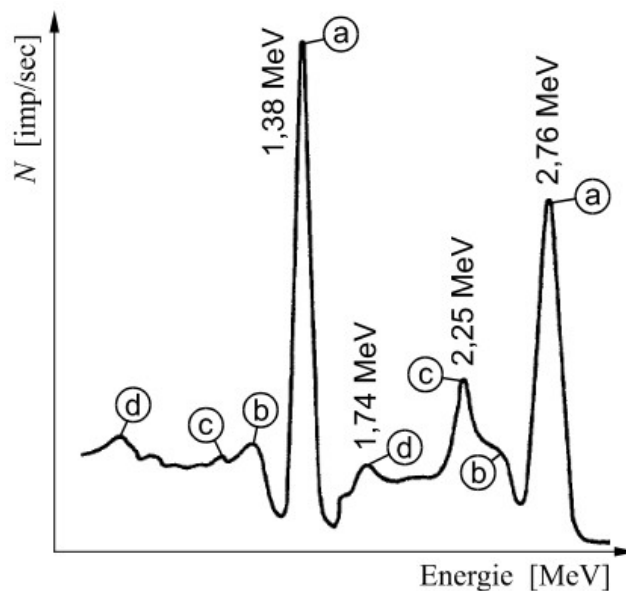
Při fotoefektu je foton gama záření pohlcen ve vnitřní energetické slupce atomu scintilační látky, přičemž předá veškerou svou energii elektronu. Elektron uvolněný fotonem gama záření (fotoelektron) se uvolní z vazby. Neobsazené místo je okamžitě zaplněno elektronem z vyšší energetické hladiny, který svou přebytečnou energii vyzáří ve formě fotonu (fotony uvolněné při fotoefektu jsou charakteristickým rentgenovým zářením dané scintilační látky). Zároveň na jiném místě scintilační látky dojde k absorpci fotoelektronu, který svou přebytečnou energii vyzáří opět ve formě fotonu. Na optický kontakt tak současně dopadají dva fotony, jejichž součet energií odpovídá energii pohlceného primárního fotonu gama záření. Protože oba fotony dopadají současně, dojde pouze k jedné scintilaci. Tato scintilace je nositelem žádané spektrometrické informace,

podle změřené energie můžeme rozlišit různé zdroje ionizujícího záření. V přístrojovém spektru označujeme tuto interakci jako **pík úplné absorpce**. Může nastat situace, kdy foton gama záření nemá dostatečně velkou energii, a tak fotoefekt proběhne v povrchové vrstvě scintilační látky, což umožní únik fotonů charakteristického rentgenového záření, přičemž je zachycen pouze fotoelektron. Energie scintilace je o tento únik menší, což se v přístrojovém spektru projeví jako **únikový pík**.

Jestliže foton záření gama interaguje na vnější energetické slupce atomu scintilátoru, nedojde k jeho absorpci, protože elektrony na vnějších energetických hladinách jsou vázány slaběji. Foton předá vázanému elektronu část své energie, což způsobí vychýlení trajektorie dopadajícího fotonu. Zároveň dojde k uvolnění elektronu z vázaného stavu (tento uvolněný elektron je označován jako Comptonovský). Elektrony uvolněné z vnějších energetických hladin mají různé energie, při dopadu na fotokatodu vytvářejí spojité spektrum (označované jako **Comptonovské kontinuum**). Energie Comptonovského elektronu závisí na směru dopadajícího fotonu ionizujícího záření, přičemž maximum energie získá při dopadu fotonu v přímém směru. V přístrojovém spektru se tato maximální energie Comptonova elektronu projeví jako **Comptonova hrana** [22].

Dalším druhem interakce gama záření se scintilační látkou je vznik elektron – pozitronového páru. K tvorbě párů dochází, když foton gama záření je absorbován jádrem atomu scintilátoru a zároveň je energie fotonu větší než 1,022 MeV. Pozitrony a elektrony při vzájemné interakci anihilují, což znamená, že veškerá klidová energie každé částice se změní na foton téže energie. Takto dojde ke vzniku dvou fotonů (každý má energii 0,511 MeV, protože klidová hmotnost elektronu i pozitronu je 0,511 MeV). Fotony uvolněné při anihilaci mohou interagovat ve scintilátoru fotoefektem (na přístrojovém spektru se zobrazí jejich energie v píku úplné absorpce) nebo Comptonovým rozptylem (jejich energie jsou započteny do spektra Comptonovského kontinua). Existuje však možnost, že jeden z fotonů unikne z detektoru, aniž by s ním interagoval. V takovém případě je zaregistrován **první anihilační pík**, jehož scintilace odpovídá energii o 0,511 MeV nižší, než je energie píku úplné absorpce. V případě, že dojde k úniku obou fotonů vzniklých anihilací elektronu a pozitronu, můžeme ve spektru pozorovat **druhý anihilační pík**, jehož scintilace odpovídá energii o 1,022 MeV nižší než je energie píku úplné absorpce. Oba únikové píky jsou v přístrojovém spektru dobře patrné, jestliže je elektron – pozitronová anihilace převládající interakcí. Na přístrojovém spektru (viz Obr. 18) můžeme pozorovat i více píků úplné absorpce. Tato skutečnost je dána faktem, že některé radionuklidy mohou vyzařovat gama fotony s různou energií [22].

Při vyhodnocování energetického spektra zářičů pomocí scintilačních detektorů je třeba brát v potaz energetickou rozlišovací schopnost scintilátoru. Detekce částic o stejné energii může vyvolat napěťový impuls, který je v jednotlivých případech odlišný. Energetická rozlišovací schopnost scintilátoru udává, jaký rozdíl energií částic může ještě být rozlišen v přístrojovém spektru.

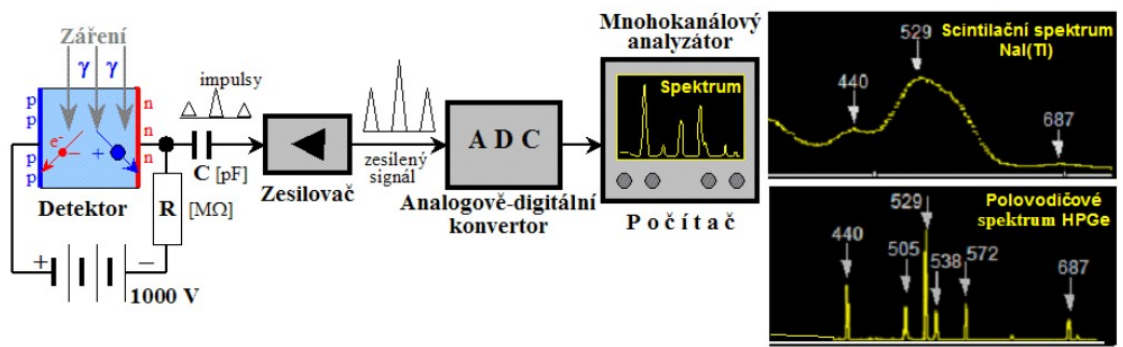


a – fotopík, b – Comptonova hrana, c – první anihilační pík, d – druhý anihilační pík

Obr. 18: Přístrojové spektrum zářiče  $^{24}\text{Na}$  [23]

#### 2.5.4 Polovodičové detektory

Svým mechanismem se polovodičové detektory podobají ionizačním detektorům, využívají totiž rovněž přímého ionizačního účinku záření. Jako detektor slouží dioda, na které je vysoké napětí (1000 – 2000 V). Dioda je zapojena v nepropustném (závěrném) směru, proto v klidovém stavu neprochází diodou žádný elektrický proud. Jestliže však do detektoru pronikne ionizující částice, způsobí předáním své energie přeskok elektronů do vodivostního pásma [15]. Elektrony se pohybují ke kladné elektrodě, kladný náboj (díry) k elektrodě záporné. Průchod nosičů náboje způsobí vznik elektrického impulsu, který je zesílen na zesilovači. Protože velikost uvolněného náboje (elektrického impulsu) je úměrná energii ionizující částice, lze určit energii dopadající částice. Spektrometrická informace se ukládá do paměti počítače. Velkou výhodou polovodičových detektorů je jejich vysoká energetická rozlišovací schopnost – zatímco u plynových detektorů je ke tvorbě jednoho páru iontů třeba energie cca 30 eV, u polovodičového detektoru je třeba k tvorbě páru energie cca 3 eV. Navíc střední hodnota energie pro vytvoření páru nezávisí na druhu záření, ale jen na teplotě a použitém polovodičovém materiálu [14]. Výstupní spektrum z polovodičového detektoru je proto na rozdíl od spekter scintilačních a ionizačních detektorů tvořené úzkými a ostrými píky (viz Obr. 19).



Obr. 19: Schéma polovodičového detektoru, srovnání scintilačního a polovodičového přístrojového [15]

## 3 Vyhořelé jaderné palivo (VJP)

### 3.1 Radioaktivní odpady

Jako radioaktivní odpad můžeme označit radioaktivní látky nebo kontaminované materiály, které nelze dále využít nebo uvést do životního prostředí. Radioaktivní odpady rozdělujeme podle skupenství na plynné, kapalné a pevné. Podle aktivity dělíme radioaktivní odpady na vysoko, středně a nízko aktivní. Speciálním typem vysoce aktivního odpadu je vyhořelé palivo jaderných reaktorů. [19]

Tab.8: Třídění radioaktivních odpadů dle IAEA [24]

Třída RAO	Charakteristika	Aktivita (Bq/g)
1. RAO vyřazené z radiační kontroly	Materiály uvolněné do životního prostředí (ŽP) bez dalších radiologických omezení	$<10^{-1}$
2. Nízkoaktivní radioaktivní odpady (NAO) a středně aktivní odpady (SAO)	Aktivita neumožňuje uvolnění do ŽP a produkované zbytkové teplo je menší než $2 \text{ kW/m}^3$	$10 - 10^8 (10^9)$ SAO od $10^6$
2.1 Krátkodobé NAO a SAO	Obsahují dlouhodobé (doba přeměny je větší než 30 roků) radionuklidy v limitovaných koncentracích	
2.2 Dlouhodobé NAO a SAO	Koncentrace dlouhodobých radionuklidů překračují limitní hodnoty pro krátkodobé RAO	
3. Vysoceaktivní radioaktivní odpady VAO	Zbytkové teplo je vyšší než $2 \text{ kW/m}^3$ a koncentrace dlouhodobých radionuklidů překračuje limitní hodnoty pro krátkodobé RAO	$>10^9$

Radionuklidy obsažené v radioaktivním materiálu se třídí dle toxicity do 4 tříd, kdy každá třída má stanovené tzv. uvolňovací limity. Pokud je měrná aktivita nižší než je uvolňovací limit pro danou třídu radionuklidu, tak radioaktivní materiál není považován za radioaktivní odpad a může být volně vypuštěn do životního prostředí (viz tab. 10). Seznam radionuklidů pro jednotlivé třídy je uveden v zákoně 307/2002 v příloze č. 2 v tabulce č. 2.

Tab. 9: Uvolňovací úrovně pro jednotlivé třídy radionuklidů [19]

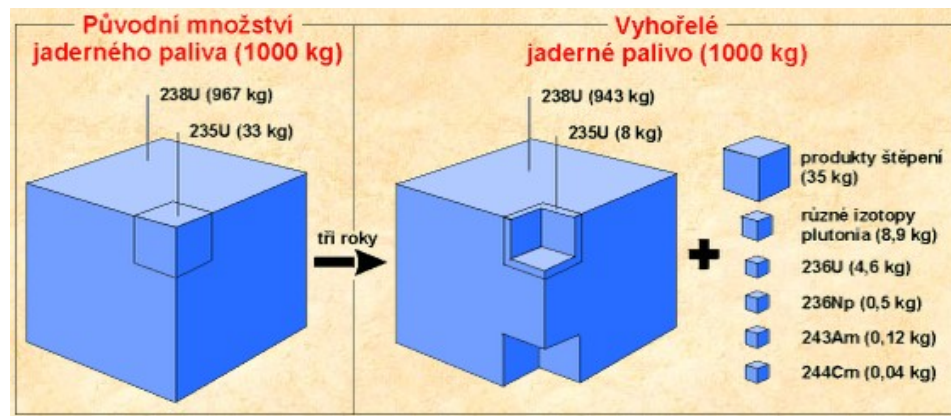
	Třída radionuklidů			
	1	2	3	4
Materiály uváděné do životního prostředí	Uvolňovací úrovně hmotnostní aktivity (kBq/kg)			
	0,3	3	30	300
Povrchy materiálů uváděných do životního prostředí	Uvolňovací úrovně plošné aktivity (kBq/m <sup>2</sup> )			
	3	30	300	3000

### 3.2 Jaderné reaktory v České republice

Složení vyhořelého reaktorového paliva a jeho míra radioaktivity je dána typem jaderného reaktoru. Typ jaderného reaktoru je určen kombinací paliva (např. nízko obohacené, vysoce obohacené, přírodní), moderátoru (grafit, lehká voda, těžká voda), chladiva (lehká voda, oxid uhličitý, sodík).

Nejběžněji užívaným typem jaderného reaktoru je tepelný reaktor chlazený a moderovaný lehkou vodou, který bývá označován jako VVER (ruská konstrukce) nebo PWR (americká konstrukce). Jaderná elektrárna Temelín má 2 reaktory VVER – 1000, kde každý reaktor má elektrický výkon 1000 MWe, v jaderné elektrárně Dukovany jsou 4 reaktory VVER – 440, 1 reaktor má elektrický výkon 440 MWe. Jako palivo do lehkovodních reaktorů se používá přírodní uran (který obsahuje přibližně 0,71 % uranu <sup>235</sup>U), obohacený na 3 – 5 % <sup>235</sup>U, zbytek představuje uran <sup>238</sup>U. Palivo se vymění po 3 – 4 letech štěpení v reaktoru. Tepelný reaktor s elektrickým výkonem asi 1000 MWe vyprodukuje přibližně 30 t vyhořelého paliva ročně, které má objem 1,5 m<sup>3</sup>. Předpokládaná životnost jaderných elektráren v České republice je 30 let. Za tuto dobu elektrárna Dukovany vyprodukuje 1500 tun uranu a aktinidů, Temelín vyprodukuje 1400 tun vyhořelého paliva (předpokládáno pro 2 reaktory). Celkem se očekává, že ČR se bude muset vypořádat s 3000 t vyhořelého jaderného paliva (odhady se různí, SÚRAO uvádí celkem 4000 t, přičemž není vyloučeno ani větší množství VJP, pro životnost elektráren 40 let [25]). Vyjmuté vyhořelé palivo z jaderných reaktorů ve světě představuje 1 % radioaktivních odpadů světa, ale představuje 90% veškeré radioaktivity. Proto trvalé uložení vysoceaktivního odpadu z jaderného reaktoru je zásadní otázkou jaderné energetiky. [26] [27]





Obr. 20: Složení jaderného paliva po vyhoření [28]

### 3.3 Obavy veřejnosti a ekologických organizací z rizik spojených se skladováním vyhořelého jaderného paliva

Hnutí DUHA vypracovalo studii o Nakládání s vyhořelým jaderným palivem ve světě [29]. V této práci DUHA formulovala obavy veřejnosti a ekologických organizací z problematiky vyhořelého jaderného paliva. Obavy vyplývají z vysoké aktivity a toxicity vyhořelého paliva a možných fatálních důsledků při kontaktu s lidským organismem, dále jsou obavy z nutnosti dlouhodobého skladování. Pozastavme se nad jednotlivými argumenty.

Ve studii Hnutí DUHA se uvádí, že po vyjmutí vyhořelého paliva z reaktoru obdrží člověk smrtelnou dávku do několika sekund, pokud by stál poblíž. Měrná aktivita vyhořelého paliva je v závislosti na čase v tabulce 11. Složení VJP je určeno použitým jaderným materiálem, způsobem ozařování a konstrukcí palivového článku. Jako aktivační produkty (AP) jsou označovány izotopy pocházející z konstrukčních materiálů palivových tyčí. Aktinidy (AKT) jsou izotopy v oblasti těžkých jader a jejich produkty (i alfa částice). Štěpné produkty (ŠP), vzniklé štěpením těžkých jader, mají přebytek energie, kterého se zbavují vyzařováním (v počáteční fázi, trvající několik minut i neutronovým zářením). Štěpné produkty mají největší podíl na celkové aktivitě VJP. V důsledku vysoké radioaktivity vyhořelého paliva rovněž dochází k uvolňování tepelné energie, kterou je nutno odvádět chlazením. [26]

Tab. 10: Celková měrná aktivita A (Ci/t) pro VJP z VVER – 1000, vyhoření 50000 Mwd/tU

[26]

	Doba po vyvezení z reaktoru (roky)								
	0	5	10	50	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>
AP	1,02*10 <sup>6</sup>	1,44*10 <sup>4</sup>	5,69*10 <sup>3</sup>	4,31*10 <sup>2</sup>	2,79*10 <sup>2</sup>	13,2	10	2,655	0,669
AKT	5,50*10 <sup>7</sup>	1,46*10 <sup>5</sup>	1,18*10 <sup>5</sup>	2,70*10 <sup>4</sup>	1,09*10 <sup>4</sup>	2,34*10 <sup>3</sup>	6,20*10 <sup>2</sup>	58	23,9
ŠP	1,91*10 <sup>8</sup>	6,68*10 <sup>5</sup>	4,53*10 <sup>5</sup>	1,62*10 <sup>5</sup>	5,03*10 <sup>4</sup>	28,3	27,2	20,9	4,742
Celk. A	2,47*10 <sup>8</sup>	8,28*10 <sup>5</sup>	5,77*10 <sup>5</sup>	1,9*10 <sup>5</sup>	6,15*10 <sup>4</sup>	2,38*10 <sup>3</sup>	6,58*10 <sup>2</sup>	81,6	29,3

Pokud bychom uvažovali, že osoba je ve vzdálenosti 30 cm od nestíněného článku VJP, které bylo právě vytaženo z jaderného reaktoru, pak smrtelná dávka by opravdu byla dosažena v řádech sekund. Příkon ekvivalentní dávky je uváděn 50 – 60 Sv/h. Smrtelné dávky 10 Sv (viz tabulka 7) by tedy bylo dosaženo za 600 s, tj. 10 minut. [30]

Je třeba si však uvědomit, že vyhořelé jaderné palivo není ihned po vyjmutí z aktivní zóny reaktoru umístěno do hlubinného úložiště a ani se to nepředpokládá. V ČR je zaveden trojstupňový systém zneškodňování VJP.

V prvním stupni je VJP uloženo do „bazénu vyhořelého paliva“ nacházejícího se vedle reaktoru. Zde je VJP uskladněno 3 – 5 let, dokud nedojde ke snížení měrné aktivity paliva v důsledku rozpadu aktinidů a štěpných produktů, které mají vysokou aktivitu, ale malý poločas rozpadu (viz tabulka 10). V bazénech je zajištěna vysoká úroveň stínění, během skladování i během manipulace musí být nad VJP vrstva vody, která zajišťuje, že nenastane situace, kdy by se mohl člověk náhodně přiblížit na nebezpečnou vzdálenost, jaká je uváděna v modelových příkladech. V žádné fázi manipulace by neměla být tloušťka vodní stínící vrstvy menší než 7 m. Navíc je voda doplňována kyselinou boritou H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, která zajišťuje trvalou podkritičnost VJP skladovaného v bazénu (tzn. že nemůže nastat štěpná reakce). Odstínění záření alfa a beta je zajištěno zirkoniovým pouzdem palivového článku. Kdyby však hypoteticky došlo k jeho poškození a k úniku radiotoxického materiálu, byla by vodní stínící vrstva pro alfa a beta záření dostačující. [31] To však není dáno žádnými mimořádnými a technicky náročnými bezpečnostními opatřeními, ale fyzikální povahou záření nesoucího elektrický náboj. Čím je nabitá částice větší, tím menší urazí dráhu ve vnějším prostředí, protože u těžkých částic (např. záření alfa) se jedná o nepružné srážky s elektrony atomového obalu, kde energie ionizujícího záření se spotřebovává na excitaci a ionizaci atomů. Tímto procesem nabitá částice ztratí při průchodu materiálem veškerou energii, čímž dojde k jejímu odstínění. Těžké nabitě částice

tedy mají v látkovém prostředí krátký dosah, který je dán vysokými ionizačními účinky (viz tabulka 11). Pokud se však těžké nabitě částice dostanou do kontaktu s živými buňkami organismu, mají nejméně biologický dopad.

Tab. 11: *Střední lineární dosah částic alfa* [32]

Energie částic alfa (MeV)	Vzduch (cm)	Biologická tkáň ( $10^{-4}$ cm)	Hliník ( $10^{-4}$ cm)
4	2,5	31	16
5	3,5	43	23
6	4,6	56	30
8	7,4	91	48
10	10,6	130	69

Odstínění lehkých nabitých částic (záření beta) je však obtížnější, protože srážky elektronů ionizujícího záření s elektrony vázanými v obalech atomů způsobují změnu dráhy lehkých nabitých částic a k ionizaci atomů dochází podstatně méně, což způsobuje větší maximální dosah lehkých nabitých částic než v případě těžkých iontů (viz tabulka 12). Kvůli menšímu ionizačnímu účinku je ale biologický negativní vliv výrazně menší.

Tab. 12: *Maximální lineární dosah částic beta* [32]

Energie částic beta (MeV)	Vzduch (mm)	Biologická tkáň (mm)	Hliník (mm)
0,01	1,3	0,002	0,0006
0,1	101	0,158	0,050
1	3060	4,80	1,52
5	19000	29,8	9,42
10	39000	60,8	19,2

Větší problém však spočívá v odstiňování nepřímo ionizujícího záření (fotony záření gama). Fotony interagují s látkovým prostředím, čímž způsobují ionizaci (interakce ionizujícího záření s látkou popsány v části o stínění). I když záření gama patří k záření řídké ionizujícímu, takže jeho negativní biologický účinek na tkáň je nejmenší, po překročení určitých dávek dochází k projevům stochastických a deterministických účinků. Abychom mohli zajistit dosažení předejití stochastických a deterministických účinků, je třeba dosáhnout stíněním bezpečné úrovně příkonu ekvivalentní dávky. ICRP (Mezinárodní komise radiační ochrany) stanovila pro zdroje ionizujícího záření jako nejvyšší přípustný

(tj. pro pracovníky se zdroji ionizujícího záření) příkon dávkového ekvivalentu 50 mSv/rok v kůži pracovníka (publikováno v ICRP 60), což odpovídá roční efektivní dávce v kůži  $H_E$ :

$$H_E = w_t H_t = 0,01 \cdot 50 = 0,5 \text{ mSv/rok} \quad (3.1)$$

Pro představu srovnáme dávkový limit pro zdroje ionizujícího záření doporučený ICRP 60 s hodnotami roční celotělové efektivní dávky pocházející z přírodních zdrojů na území ČR. Pokud bychom uvážili, že průměrný jedinec z obyvatelstva je ozářen z přírodních zdrojů rovnoměrně, pak roční efektivní dávka v kůži činí 3,5 mSv/rok. Ve skutečnosti lze předpokládat, že efektivní dávka v kůži je vyšší, protože kůže patří k částem lidského těla, které jsou nadprůměrně exponovány ionizujícím zářením. Můžeme tedy usoudit, že bezpečnostní limity jsou přísnější, než je nutné, protože průměrná roční efektivní dávka z přírodního ozáření v ČR nezpůsobuje žádné zaznamenané stochastické účinky, proti kterým by bylo nutné podniknout ochranná opatření.

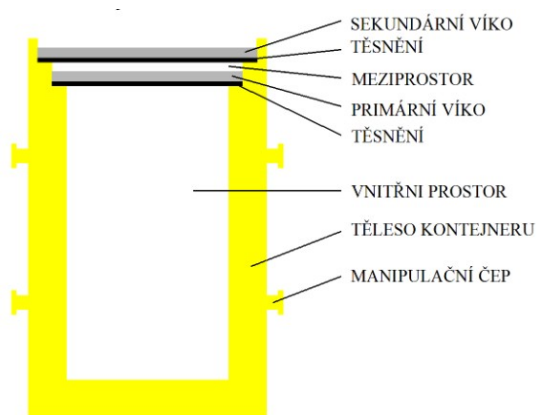
Nyní se však zaměříme na to, jak jsou tyto přísné dávkové limity naplňovány. V bazénech VJP je udržován minimálně 7 m sloupec vody nad palivovými články. Právě tato výška je udržována za všech okolností (i během manipulace s VJP) aby byla zajištěna dostatečná ochrana před fotonovým ionizujícím zářením. Pro posouzení, zda je tato vrstva dostatečná, je nutné znát energie fotonů emitovaných radionuklidů VJP. Pro hrubou představu jsou v tabulce 14 uvedeny hodnoty polotlouštěk pro typické stínící materiály a několik rozsahů energií. Je ale dlužno podotknout, že hodnoty polotlouštěk se počítají pomocí výpočetních programů, do kterých jsou zadány přesné vstupní údaje o složení VJP (podle typu reaktoru) a přesné energie fotonů pro dané radionuklidy. Jestliže příkon ekvivalentní dávky ve vzdálenosti 30 cm je rok po vytažení z aktivní zóny reaktoru je uváděn 50 – 60 Sv/h, potom je považována stínící vrstva 3 m vody za dostatečnou (polotloušťka odpovídá 8 cm).

Tab. 13: Polotloušťka daného materiálu v závislosti na energii fotonů gama záření. [32]

Energie (MeV)	Polotloušťka $d$ (cm)			
	voda	beton	železo	olovo
0,5	7,8	3,0	1,11	0,42
1,0	10,2	4,5	1,56	0,9
3,0	18,3	7,8	2,31	1,47
	5,023,1	9,9	2,88	1,47

Po uplynutí doby 5 let se VJP přemísťuje z bazénů do meziskladů. V současnosti (2015) je na území ČR v provozu mezisklad VJP v komplexu JE Dukovany a od roku

2010, byl uveden do provozu mezisklad rovněž v JE Temelín [25]. V tomto meziskladu má být VJP skladováno po dobu až 60 let, než bude trvale uloženo v hlubinném úložišti. VJP se uzavírá do ochranných kontejnerů CASTOR, které jsou vyrobeny tak, aby splňovaly přísné bezpečnostní podmínky. Každý kontejner je vyroben z tvárné oceli, jejíž vnitřní plocha je pokryta korozivzdorným niklem. Ve stěně kontejneru CASTOR jsou umístěny polyethylenové tyče, které slouží k lepšímu odstínění neutronů. Naplněný kontejner se uzavírá dvěma víky, mezi nimiž je prostor naplněný heliem pod tlakem  $6,5 \cdot 10^5$  Pa. Následně se naplněný kontejner uloží do meziskladu vyhořelého paliva, kde je neustále monitorována teplota VJP a tlak mezi víky kontejneru. Prostor meziskladu je trvale kamerově monitorován Mezinárodní agenturou pro atomovou energii (IAEA). Na povrchu kontejneru je maximální příkon dávkového ekvivalentu 2 mSv/h – na povrchu kontejneru tedy lze obdržet ekvivalentní dávku 10 Sv za 5000 hodin, což v reálných podmínkách nepředstavuje riziko. [31]



Obr. 21: Kontejner CASTOR [31]

Po 60 letech skladování v meziskladech bude VJP přemístěno do trvalých hlubinných úložišť (v ČR se předpokládá otevření hlubinného úložiště okolo roku 2065). Ve zprávě hnutí DUHA [29] jsou uvedeny problémy týkající se fungování hlubinného úložiště:

- v lokalitě hlubinného úložiště musí být prakticky vyloučena přítomnost podzemní vody, která by mohla po čase způsobit korozi kontejnerů a kontaminaci podzemní vody, která může transportovat radiotoxický materiál až na povrch
- oblast musí být tektonicky klidná, protože tektonická činnost by mohla způsobit narušení masivu horniny, nebo dokonce přímé poškození kontejnerů. Tektonická činnost může navíc způsobit změnu pohybu podzemní vody, která může ohrozit

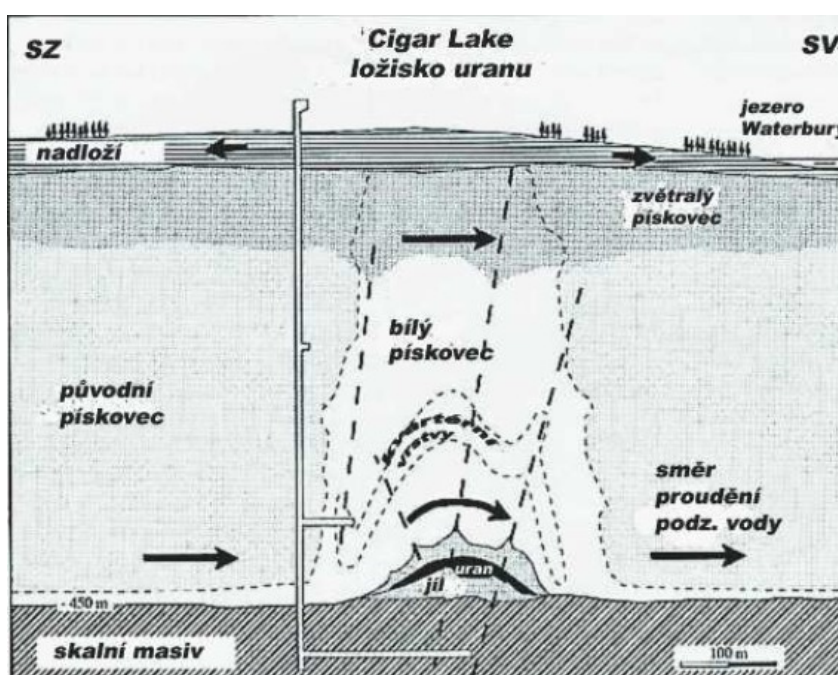
hlubinné úložiště. Tyto bezpečnostní požadavky by měli být dodrženy po dobu 100 000 let.

I když jsou tyto podmínky značně obtížně řešitelné, v principu lze dosáhnout jejich splnění, což můžeme doložit příklady ze samotné přírody.

### 3.4 Přírodní analogy

#### 3.4.1 Cigar lake

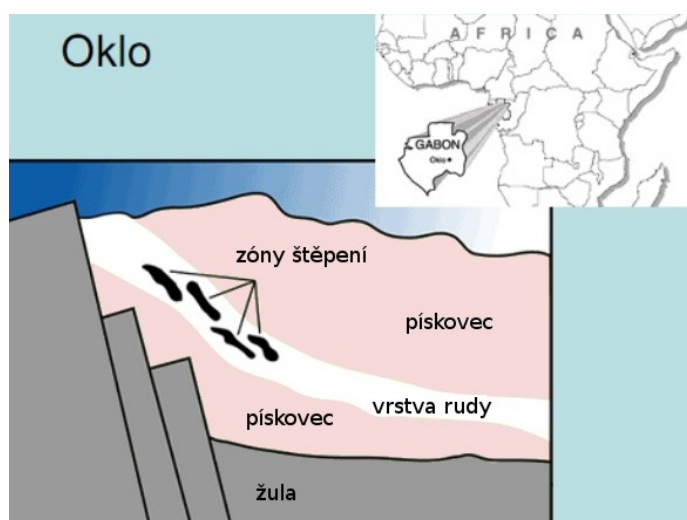
Při řešení problematiky hlubinného úložiště je zajímavé si povšimnout přírodních nalezišť uranu a jejich vlivem na biosféru. Mezi nejdůležitější oblasti, jejichž výzkum má velký význam pro projektování hlubinných úložišť, patří naleziště Cigar lake v Kanadě. Ložisko Cigar lake obsahuje 11 % známých zásob uranu. [33] Úložiště je zajímavé také svou geologickou stavbou. Ložisko obsahující uran je odděleno jílem od pískovce, který na rozdíl od jílu je propustnou horninou, tzn. že vede podzemní vodu. Naleziště se nachází 430 m pod zemí a jeho stáří je odhadováno na 1,3 miliardy let. V místě naleziště se nachází geologické zlomy i stopy kvartérního zvrásnění, což jsou geologické poruchy, které jsou pro dlouhodobé uložení VJP nevyhovující. Přesto není zaznamenána žádná kontaminace biosféry radionuklidy pocházejícími z přírodního úložiště uranu. Pro uložení VJP je velmi inspirativní fakt, že zabránění migrace kontaminantů do biosféry zabránila pouze vrstva jílu a uložení ložiska v dostatečné hloubce. [30]



Obr. 22.: Příčný řez ložiska uranu v Cigar lake [30]

### 3.4.2 Oklo

Dalším důležitým přírodním analogem je ložisko uranu v africkém státě Gabon. Přibližně před 2 miliardami let probíhala v tomto ložisku samovolná štěpná reakce [34]. Zahájení štěpné reakce před 2 miliardami let umožnil fakt, že v této době se obohacení uranové rudy izotopem uranu 235 pohybovalo okolo 3 %, což odpovídá nízko obohacenému palivu v českých jaderných elektrárnách., zatímco dnes přírodní uranová ruda obsahuje pouze 0,72 % izotopu 235. Rozdíl v podílu přírodní uranu 235 a 238 je způsoben tím, že poločas rozpadu uranu 235 je  $7,04 \cdot 10^8$  let , přičemž poločas rozpadu izotopu uranu 238 je 4,5 miliardy let, proto podíl izotopu uranu 235 stále s časem klesá. Důkazem, že v Oklo skutečně probíhalo jaderné štěpení, je přítomnost produktů po štěpení plutonia 239. Pro technologii ukládání VJP je zajímavá „přírodní vitrifikace“. Vitrifikace je zatavení kontaminantů do skelného obalu, čímž se zamezuje kontaktu s okolním prostředím. Produkty štěpení z ložiska v Oklo jsou „zapouzdřeny“ v tavených aluminium – fosfátových zrnech, což představuje zajímavou inspiraci pro jaderné inženýry zabývající se dlouhodobým uskladněním VJP. Studium přírodního naleziště v Oklo rovněž dokládá dobrou vypovídající hodnotu matematických modelů vypracovaných pro simulaci migrace kontaminantů, protože údaje o migraci kontaminantů získané průzkumem naleziště odpovídají použitým matematickým modelům. Výzkum naleziště v Oklo rovněž doložil, že dlouhodobé produkty štěpné reakce, jako plutonium a neptunium, migrují prostředím velmi pomalu – rychlostí přibližně 10 m za milion let. [35] [36]



Obr. 23: Příčný řez nalezištěm v Oklo, upraveno [37]

### 3.4.3 Další přírodní analogy

Morro de Ferro je oblast nacházející se ve střední Brazílii, která vykazuje jednu z nejvyšších aktivit na Zemi. Vysoká aktivita je dána přítomností terestrických radionuklidů. Thoriové rudy, které se nacházejí ve svahu jsou neustále vyplavovány proudící vodou. Protože thorium má podobné migrační vlastnosti jako plutonium, bylo Morro de Ferro podrobeno výzkumu ohledně migrace radiokontaminantů. Bylo prokázáno, že v případě plutonia by nedošlo ve směru proudění vody k překročení limitů pro pitnou vodu. [33]

Přírodním analogem, který nám poskytuje cenné informace ohledně migrace uranu je ložisko Alligator River v Austrálii. Dalším místem, sledovaným kvůli migračním vlastnostem uranu je také Pocos de Caldas, nacházející se ve stejné oblasti brazilské vysočiny jako Morro de Ferro. Předmětem výzkumu týkajícího se trvalého uložení VJP se také stala ložiska jílu pod ostrovem Gotland poblíž Sardinie. Výzkum se zaměřil na sledování změn vlastností ložiska jílu způsobeného vlivem vyšších teplot, které jsou zapříčiněny přirozeným vývinem tepla z vulkanických hornin. Výsledky studií ukázaly, že tepelně modifikovaný jíl si zachovává výborné izolační vlastnosti. Příčinou sledování změn vlastností jílu vlivem vyšších teplot je vývin tepla uvnitř VJP, jehož teplota může narůst až na 100 °C. [33] V ČR byl rovněž prozkoumáván přírodní analog – naleziště Ruprechtov. Uranová ruda se nachází v jílu, který zpomaluje migraci uranu v takové míře, že nejsou přítomny žádné stopy kontaminace v okolní biosféře [35].

## 3.5 Hlubinné úložiště v ČR

Na území ČR bylo pomocí výzkumu vybráno několik míst vhodných k uložení VJP: Čertovka, Březový potok, Magdaléna, Čihadlo, Hrádek, Horka, Kraví hora [38]. Hlubinné úložiště má být vybudováno v masívu žuly, v hloubce okolo 500 m. Aby bylo zamezeno kontaminaci biosféry, bude hlubinné úložiště zajištěno několika bariérami.

První bariérou u VJP skladovaného v hlubinném úložišti bude tzv. chemická matrice. Vyhořelý prut je uložen do skla (borosilikátového). Díky tomu jsou radionuklidy znehybněny. Životnost skelné hmoty může být až 1 milion let.

Další bariéru představuje obal silnostěnného ocelového kontejneru, jehož minimální životnost není menší jak tisíc let. Stěny kontejneru mohou být vyrobeny i z titanu nebo mědi.

Kontejnery budou obklopeny jílovými materiály (nebo betonem), což bude představovat další technickou bariéru. Životnost inženýrských bariér se odhaduje na cca 300 let.

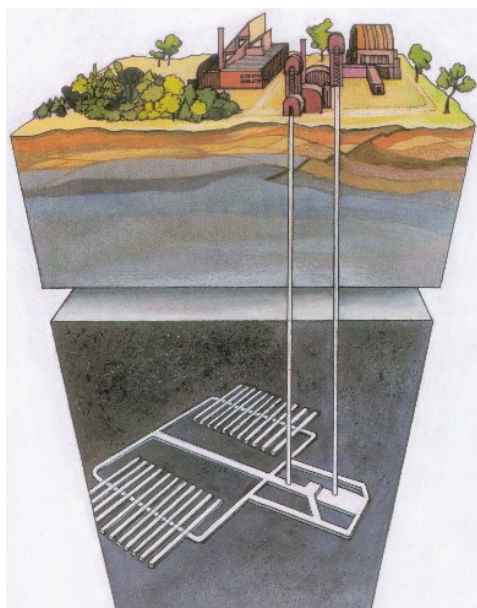


Nejdůležitější bariéru však představuje geologické podloží, do kterého je hlubinné úložiště vhloubeno. Požadavkem je, aby hornina byla seismicky stabilní, což znamená, že hornina neprodělala žádnou seismickou aktivitu za posledních několik miliónů let. Požadavkem je, aby hornina dokázala bezpečně oddělit VJP od biosféry i při selhání inženýrských bariér.

V případě, že by došlo k selhání jedné bariéry, bude další bariéra schopna ji nahradit. V případě poškození silnostěnného kontejneru zajistí izolaci výplňový materiál (jíl, beton). V případě narušení i výplňového materiálu bude hornina podloží schopna oddělit radiokontaminanty od biosféry. Chování kontaminantů je předmětem matematických modelů, které opírají své výpočty o poznatky z výše uvedených přírodních analogů. Navíc jsou vypracovány i matematické modely, které zahrnují chybné kroky při ukládání (např. zásah člověka do úložného systému, důsledky chyb v technologii ukládání, nepříznivé přírodní události). Takto je zajištěna maximální bezpečnost.

Pro úplnost dodejme, že český koncept na hlubinné ukládání VJP je konvenční a stejným způsobem budou řešit uložení VJP do žulového masivu i další státy (např. Finsko, Švédsko, Japonsko). Další varianty uložení jsou do jílu (Francie, Belgie, Švýcarsko), do soli (Německo), tuf – hornina vulkanického původu (USA) [39].

Budování hlubinného úložiště má však i své stinné stránky. Je třeba připomenout, že hlubinné úložiště bude muset pojmout přibližně 4000 tun VJP (za předpokladu, že JE Temelín a Dukovany budou pracovat 40 let) [25], tudíž hloubení prostoru pro takové množství odpadu bude znamenat velký zásah do krajiny. Nad samotným úložištěm má být komplex o rozloze několika hektarů (SÚRAO uvádí 29,5 ha [40]). Je tedy jisté, že komplex o rozloze několika hektarů znamená estetickou újmu pro krajinu, proto se některá sdružení či místní obávají o budoucnost turistického ruchu [41]. Na druhou stranu je fakt, že dotčené obce dostanou od státu roční příspěvky, celkem přibližně 10 miliónů korun [38].



Obr. 24: *Koncept hlubinného úložiště v ČR [25]*

## Závěr

Poznatky týkající se problematiky VJP se opírají o teoretické studium radioaktivity, které probíhá již několik desítek let (objev radioaktivity na konci 19. století Roentgenem, Bequerelem). Rozsáhlé teoretické bádání ohledně účinků radioaktivity bylo významně doplněno také praktickými zkušenostmi (lékařské studie týkající se obyvatelstva zasaženého atomovou bombou v Nagasaki a Hirošimě - 1945). Později lidstvo získalo zkušenosti v oblasti jaderné bezpečnosti po havarijních událostech v Three Mile Island (1979), Černobyli (1986) nebo Fukušimě (2011). Tyto zkušenosti a teoretické studie se podílely na utváření dozimetrických veličin a formulování dávkových limitů pro běžné obyvatelstvo i pracovníky se zářením (vyhláška ICRP 60). S technickým pokrokem se rovněž zdokonalovaly dozimetrické přístroje, které umožnily objevit i radioaktivitu vyskytující se všude kolem nás (radon v budovách, radionuklidy v potravinách, kosmické záření) a určit velikost dozimetrických veličin pocházejících z okolní přírody, přičemž to nám umožnilo srovnání s umělými zdroji záření (lékařské ozáření, povolené limity výpustí pro JE). Všechny tyto faktory se podílely na odborné formaci institucí odpovědných v oblasti jaderné a radiační bezpečnosti (SÚJB, SÚRAO, ICRP). Problematika samotného uložení VJP a výběru lokality se mimo matematických modelů opírá i o geologický a fyzikální výzkum přírodních analogů ve světě (Cigar lake, Oklo, Morro de Ferro). Vhodnost ověřených přírodních podmínek pro uložení VJP bude posílena budováním inženýrských bariér.

Stále však existují obavy, týkající se transparentnosti odpovědných institucí. Bohužel, tyto obavy se zakládají i na historické zkušenosti (bezprostřední informace ohledně události v JE Černobyl). V našem státě je však transparentnost zajištěna volným přístupem k informacím a možností různých iniciativ, které mohou vyjadřovat i své pochybnosti a námítky, přičemž mohou volně šířit své názory. Podle mého názoru, existence iniciativ stavících se proti hlubinnému úložišti nebo jaderné energetice obecně (viz internetové stránky <http://www.temelin.cz/>, <http://www.nechcemeuloziste.cz/>, <http://www.jihoceskematomy.cz/> sekce energetika), je dostatečným důkazem transparentnosti státních institucí ČR. Dalším garantem nezávislých informací jsou mezinárodní instituce zabývající se problematikou radiační bezpečnosti.

Navzdory dlouholeté zkušenosti a intenzivnímu teoretickému bádání na poli radioaktivity, maximální zodpovědnosti, dobré vůli a transparentnosti, nikdo nemůže zaručit nulové riziko. Je to dáno prostým faktem, že lidský jedinec je v kterémkoliv okamžiku vystaven jistému riziku, sice různého druhu a odlišné míry, ale i tak riziko

existuje. Úkolem zodpovědných institucí je svými poznatky a opatřeními tato rizika minimalizovat. Proto je diskuse, která požaduje ověření poznatků oprávněná, stejně jako nárok veřejnosti na informace o jaderné energetice. Dodejme, že je dostatek informací i ochoty je sdílet, ne však každý všemu porozumí, protože mu chybí dostatečný fyzikální základ. Mou snahou bylo, zpracovat přehled základních poznatků a aspektů, vstupujících do problematiky VJP.

## Seznam zkratek

$\alpha$	alfa záření
$\beta$	beta záření
$\gamma$	gama záření
$\beta^+$	proud pozitronů
$\beta^-$	proud elektronů
LET	lineární přenos energie (Linear Energy Transfer)
Q (též RBE, $w_R$ )	jakostní faktor (Quality factor, Relative Biological Effectiveness)
$w_T$	tkáňový váhový faktor (Weighting factor)
$H_{PZ}$	průměrná roční efektivní dávka jedince ze světové populace z jednotlivých přírodních zdrojů záření
$H_{UZ}$	průměrná roční efektivní dávka pocházející z jednotlivých umělých zdrojů
$h_{inh}$	konverzní faktor pro přepočtení na úvazek efektivní dávky při vdechnutí (inhalaci) daného radionuklidu
$h_{ing}$	konverzní faktor pro přepočtení na úvazek efektivní dávky při polknutí (ingesci) daného radionuklidu
IAEA	International Atomic Energy Agency (též MAAE – Mezinárodní agentura pro atomovou energii)
ICRP	International commission on radiological protection (Mezinárodní komise pro radiační bezpečnost)
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (Vědecký výbor OSN pro účinky atomového záření)
GM detektor	Geiger – Müllerův detektor
RAO	Radioaktivní odpady
NAO	Nízkoaktivní odpady
SAO	Středněaktivní odpady
VAO	Vysoceaktivní odpady
ŽP	Životní prostředí
VVER	Vodo-vodní energetický reaktor
PWR	Pressurized water reactor (tlakovodní reaktor)
VJP	Vyhořelé jaderné palivo
AP	Aktivační produkty
AKT	Aktinidy

ŠP	Štěpné produkty
JE	Jaderná elektrárna
CASTOR	Cask for storage and transport of radioactive material (Sud pro skladování a přepravu radioaktivního materiálu)
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivního odpadu
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost

## Seznam použitých pramenů

- [1] KRÁLOVÁ, Magda. *Modely atomového jádra* [online]. [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: [http://www.techmania.cz/edutorium/art\\_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=4a616465726ee12066797a696b61h&key=1362](http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=4a616465726ee12066797a696b61h&key=1362)
- [2] JANEČEK, Ivan, René KALUS a Daniel HRIVŇÁK. *Kvantová, atomová a jaderná fyzika* [online]. Dostupné z: <http://artemis.osu.cz/mmffyz/index.htm>
- [3] REICHL, Jaroslav, Martin VŠETIČKA a . *Encyklopedie fyziky: Vázebná energie jádra* [online]. [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/799-vazebna-energie-jadra>
- [4] ULLMANN, Vojtěch a . *Jaderná a radiační fyzika* [online]. [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika2.htm>
- [5] REICHL, Jaroslav, Martin VŠETIČKA a . *Encyklopedie fyziky: Záření gama* [online]. [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/805-zareni-gama>
- [6] PROCHÁZKA, Vít. *Atomová a jaderná fyzika: studijní modul*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012, 70 s. ISBN 978-80-244-3294-6.
- [7] ULLMANN, Vojtěch. *Biologické účinky radiačního záření: radiační ochrana* [online]. [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/RadiacniOchrana.htm>
- [8] *Principy a praxe radiační ochrany*. 1. vyd. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2000, 619 s. ISBN 80-238-3703-6.
- [9] SKALICKÁ, Zuzana, Jiří HALAŠKA, Renata HAVRÁNKOVÁ, Jiří KUBEŠ a Leoš NAVRÁTIL. *Radiobiologie: Ozáření obyvatel* [online]. [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/7-kapitola/77/772.html#obr37>
- [10] Státní úřad pro jadernou bezpečnost. *Radiační ochrana: Stručný přehled biologických účinků záření* [online]. [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: <http://www.sujb.cz/radiacni-ochrana/oznameni-a-informace/strucny-prehled-biologicky-ucinku-zareni/>
- [11] ROSINA, Jozef. *Biofyzika: pro zdravotnické a biomedicínské obory*. Vyd. 1. Praha: Grada, 2013, 224 s. ISBN 978-80-247-4237-3.
- [12] World Nuclear Association. *Nuclear Radiation and Health Effects* [online]. [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/info/Safety-and-Security/Radiation-and-Health/Nuclear-Radiation-and-Health-Effects/>
- [13] HUŠÁK, Václav. *Zdroje ionizujícího záření* [online]. [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: [http://eamos.pf.jcu.cz/amos/kra/externi/kra\\_7169/ch01.htm](http://eamos.pf.jcu.cz/amos/kra/externi/kra_7169/ch01.htm)
- [14] GERNDT, Josef a Petr PRŮŠA. *Detektory ionizujícího záření*. 2., přeprac. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011, 182 s. ISBN 978-80-01-04710-1.
- [15] ULLMANN, Vojtěch. *Detekce a spektrometrie ionizujícího záření: Ionizační detektory s plynovou náplní* [online]. [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm>
- [16] *Jaderná fyzika* [online]. [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: <http://vyuka.jihlavsko.cz/jaderna-energie/obr/souprGamaBeta-s-pocitacem.jpg>
- [17] MAŠLÁŇ, Miroslav, Libor MACHALA a Jiří TUČEK. *Praktikum z atomové a jaderné fyziky: Charakteristika Geiger - Müllerova detektoru* [online]. [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/fp5.pdf>
- [18] LUKŠAN, Václav. *Měřič ionizujícího záření*. Dostupné také z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/61740/F3-DP-2015-Luksan-Vaclav-DP\\_luksavac.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/61740/F3-DP-2015-Luksan-Vaclav-DP_luksavac.pdf?sequence=2&isAllowed=y). Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Pavel Máša.
- [19] SINGER, Jan. *Dozimetrie ionizujícího záření*. 1. vyd. České Budějovice: Jihočeská univerzita, Zdravotně sociální fakulta, 2005, 67 s. ISBN 80-7040-752-2.
- [20] MAŠLÁŇ, Miroslav, Libor MACHALA a Jiří TUČEK. *Praktikum z atomové a jaderné fyziky: Interakce gama záření s látkou* [online]. [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/fp5.pdf>
- [21] KREJČÍ, Vladimír. *Scintilační detektory* [online]. [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: <http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/Svadlenkova/Scintilacni%20detektory.pdf>
- [22] MAŠLÁŇ, Miroslav, Libor MACHALA a Jiří TUČEK. *Praktikum z atomové a jaderné fyziky: Měření spekter zářičů gama* [online]. [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/fp5.pdf>
- [23] FAV v Plzni. *Měření energetického spektra záření gama scintilačním detektorem ETEKT O REM* [online]. [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: [http://www.kfy.zcu.cz/dokumenty/FP2/UF140\\_2.pdf](http://www.kfy.zcu.cz/dokumenty/FP2/UF140_2.pdf)
- [24] VOHRALÍK, L. *Nové trendy v ukládání RaO*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 60 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Oldřich Matal, CSc. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=29793](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29793)

- [25] SÚRAO. *Úložiště radioaktivních odpadů: Co je hlubinné úložiště* [online]. [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: <http://www.surao.cz/cze/Uloziste-radioaktivnich-odpadu/Budouci-hlubinne-uloziste/Co-je-hlubinne-uloziste>
- [26] MATĚJKA, Karel. *Výhořelé jaderné palivo*. Praha: Ministerstvo životního prostředí České republiky, 1996, 145 s. Phare, Sv. 5. ISBN 80-7078-352-4.
- [27] ŠEDA, Josef. *Dozimetrie ionizujícího záření*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983, 418 s.
- [28] ČEZ. *Výhořelé palivo* [online]. [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: [http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/palivo\\_4.html](http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/palivo_4.html)
- [29] Hnutí DUHA. *Nakládání s vyhořelým jaderným palivem ve světě* [online]. 2003 [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: [http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/palivo\\_4.html](http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/palivo_4.html)
- [30] KURÁŽ, Michal. *Hlubinná úložiště radiotoxických odpadů*. Dostupné také z: <http://klobouk.fsv.cvut.cz/~miguel/reserse.pdf>. Práce ke státní doktorské zkoušce. ČVUT Praha. Vedoucí práce Ing. Jana Valentová, CSc.
- [31] TESAR, Filip. *Odvod tepla a vývin tepla vyhořelého jaderného paliva v úložištích*. Dostupné také z: [https://is.muni.cz/th/209747/pedf\\_m/Odvod\\_tepla\\_a\\_vyvin\\_tepla\\_vyhoreleho\\_jaderneho\\_paliva\\_v\\_ulozistich.pdf](https://is.muni.cz/th/209747/pedf_m/Odvod_tepla_a_vyvin_tepla_vyhoreleho_jaderneho_paliva_v_ulozistich.pdf). Diplomová práce. Masarykova univerzita. Vedoucí práce RNDr. Jindřiška Svobodová, Ph.D.
- [32] LUKŠ, Aleš. *Radiologický Ráj: Interakce IZ* [online]. [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: <http://rr.chytrak.cz/index.php?show=4&pg=fyzika>
- [33] WHITLOCK, Jeremy. *Canadian Nuclear FAQ: Waste Management* [online]. [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: [http://www.nuclearfaq.ca/cnf\\_sectionE.htm#v2](http://www.nuclearfaq.ca/cnf_sectionE.htm#v2)
- [34] CEJNAR, pavel. *Oklo - jaderné reaktory z pravěku* [online]. [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: <http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/cejnar/publikace/Oklo.htm>
- [35] SÚRAO. *Úložiště radioaktivních odpadů: Bezpečnost* [online]. [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: <http://www.rawra.cz/cze/Uloziste-radioaktivnich-odpadu/Budouci-hlubinne-uloziste/Bezpecnost>
- [36] TOUŠEK, Václav, Josef KUNC a Jiří VYSTOUPIL. *Ekonomická a sociální geografie*. Plzeň: Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, 2008, 411 s. ISBN 978-80-7380-114-4.
- [37] SALAZAR, Mia a Laurissa SANCHEZ. *Gambassa: Life History Event Timeline* [online]. [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: <http://www.gambassa.com/public/project/3259/MiaandLaurissa.html>
- [38] SÚRAO. *Úložiště radioaktivních odpadů: Zvažované lokality* [online]. [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: <http://www.rawra.cz/cze/Uloziste-radioaktivnich-odpadu/Budouci-hlubinne-uloziste/Zvazovane-lokality>
- [39] SÚRAO. *Úložiště radioaktivních odpadů: Zahraniční přístupy k hlubinnému ukládání* [online]. [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: <http://www.rawra.cz/cze/Uloziste-radioaktivnich-odpadu/Budouci-hlubinne-uloziste/Zahranicni-pristupy-k-hlubinnemu-ukladani>
- [40] SÚRAO. *Úložiště radioaktivních odpadů: Koncept hlubinného úložiště v ČR* [online]. [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: <http://www.surao.cz/cze/Uloziste-radioaktivnich-odpadu/Budouci-hlubinne-uloziste/Koncept-hlubinneho-uloziste-v-CR>
- [41] KRÍŽOVÁ, Helena. *Žďárské vrchy: „Nechceme tu radioaktivní sajrajt,“ tvrdí občanského sdružení „Nechceme úložiště Kraví hora“* [online]. [cit. 2015-08-04]. Dostupné z: <http://www.zdarskevrchy.cz/zajimavosti/rozhovory/6381-nehceme-tu-radioaktivni-sajrajt-tvrdi-obcanske-sdruzeni-nehceme-uloziste-ktravi-hora>



## Příloha

Seznam důležitých státních i mezinárodních institucí zabývajících se radiační bezpečností a užitečné internetové zdroje informací.

### Česká republika:

SÚJB (Státní úřad pro jadernou bezpečnost): <http://www.sujb.cz/>

Vykonává státní správu a dozor při mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření. Dohlíží na dodržování limitů radiačních dávek přístrojů stanovených zákonem (Atomový zákon).

SÚRAO (Správa úložišť radioaktivního odpadu): <http://www.surao.cz>

Instituce podléhající státu, zajišťuje likvidaci a bezpečné ukládání radioaktivního odpadu v souladu s legislativou. Rovněž řeší otázku místa a budování hlubinného úložiště v ČR.

SÚRO (Státní úřad radiační ochrany): <http://www.suro.cz>

Zajišťuje činnost radiační monitorovací sítě (zda nedošlo k překročení normy příkonu ekvivalentní dávky na daném místě). Rovněž vyhledává budovy se zvýšenou koncentrací radonu v ČR. Jeho úkolem je analyzovat mimořádné radiační události v terénu.

### Mezinárodní instituce:

IAEA (International atomic energy agency): <https://www.iaea.org/ourwork>

Někdy bývá používána počestěná zkratka MAAE (Mezinárodní agentura pro atomovou energii). Náplní její činnosti je inspekce dohlížející na nerozšiřování jaderných zbraní, dále pak se vyjadřuje k otázkám radiační bezpečnosti.

ICRP (International commission on radiological protection): <http://www.icrp.org>

Mezinárodní komise pro radiační bezpečnost. Komisi vytváří nejlepší specialisté v oboru radiační ochrany. Její činnost spočívá ve vytváření vyhlášek a publikací, které se opírají o vědeckou činnost komise. Tyto vyhlášky pak slouží jako určité standardy a normy pro radiační normy jednotlivých států.

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation): [http://www.unscear.org/unscear/en/about\\_us.html](http://www.unscear.org/unscear/en/about_us.html)

Vědecký výbor OSN pro účinky atomového záření. Vydává nezávislé zprávy o zdrojích a účincích ionizujícího záření. Tyto publikace jsou považovány za autoritativní zdroj informací a slouží jako vědecký základ pro posouzení rizik záření.

### **Užitečné internetové zdroje informací:**

- Fyzikální poznatky o mikrosvětě, ionizující záření, vysvětlení dozimetrických veličin, dozimetrické přístroje:  
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/796-jaderna-fyzika> ,  
<http://artemis.osu.cz/mmfyz/> ,  
<http://astronuklfyzika.cz/Fyzika-NuklMed.htm>
- Poznatky k hlubinnému úložišti:  
[http://www.hnutiduha.cz/sites/default/files/publikace/typo3/Vyhorele\\_jaderne\\_paliv\\_o\\_svet.pdf](http://www.hnutiduha.cz/sites/default/files/publikace/typo3/Vyhorele_jaderne_paliv_o_svet.pdf) ,  
[http://www.nuclearfaq.ca/cnf\\_sectionE.htm#v2](http://www.nuclearfaq.ca/cnf_sectionE.htm#v2) ,  
<http://klobouk.fsv.cvut.cz/~miguel/reserse.pdf> ,  
<http://www.jaderny-odpad.cz/hlubinne-uloziste.htm>
- Radioaktivita kolem nás, účinky záření: <http://www.world-nuclear.org/info/Safety-and-Security/Radiation-and-Health/Nuclear-Radiation-and-Health-Effects/>