

# Radioekologie

## Osnova

1. Obecné pojmy
  - 1.1. Symbolika
  - 1.2. Pojmy
  - 1.3. Hmotnost atomu
  - 1.4. Energie
2. Radioaktivita
  - 2.1. Hmotnostní podmínka
  - 2.2. Druhy radioaktivních přeměn
  - 2.3. Kinetika radioaktivních přeměn
  - 2.4. Přírodní RN
3. Ionizující záření
  - 3.1. Vlastnosti ionizujícího záření
  - 3.2. Zdroje IZ
  - 3.3. Ochrana před IZ
  - 3.4. Detekce IZ
  - 3.5. Biologické účinky IZ
4. Radioaktivita a ionizující záření v životním prostředí
  - 4.1. Kosmické záření a kosmogenní RN
  - 4.2. Přírodní RN s dlouhým poločasem přeměny
  - 4.3. Radon
  - 4.4. Jaderné elektrárny
  - 4.5. Havárie jaderných reaktorů
  - 4.6. Nehody při práci s radioaktivními látkami
  - 4.7. Pokusné jaderné a termonukleární výbuchy
  - 4.8. Umělé zdroje IZ
  - 4.9. Radioaktivní odpady

# Obecné pojmy

## 1.1. Symbolika

${}^A_ZX^N$  běžný zkrácený zápis:  ${}^AX$

A – nukleonové číslo ( $A=Z+N$ )

Z – protonové číslo

N – neutronové číslo

**Zvláštní symbolika:** D – deuterium –  ${}^2\text{H}$   
T – tritium –  ${}^3\text{H}$

## 1.2. Pojmy

**nuklid(y)** – soubor identických atomů jejichž jádra tedy mají identické složení, stejné A i Z

**isotopy** – soubor atomů které mají stejné protonové (Z) ale různé neutronové N (tím pádem i A) číslo

**isobary** – nuklidy které mají stejné nukleonové (A) ale různé protonové číslo

**radio** – značí že jádro je nestabilní a samovolně se rozpadá

**Příklady:** Isobary:  ${}^{40}\text{Ar}$ ,  ${}^{40}\text{K}$ ,  ${}^{40}\text{Ca}$ .

## 1.3. Hmotnost atomu

kg x u definice u:  $u = 1/12 m({}^{12}\text{C})$

po vyčíslení:  $u = 0,012 / (12,6,022 \cdot 10^{23}) = 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1 \text{ u}$

## 1.4. Energie

**J x eV** definice eV: je to energie kterou elektron získá při průchodu potenciálovým spádem 1V  **$E = Q \cdot \Delta U$**   
po vyčíslení:  **$E = Q \cdot \Delta U = 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 1 = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1 \text{ eV}$**

Příklady: Energie fotonu viditelného záření.

$$\lambda = 550 \text{ nm} = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}; h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}; c = 2,997 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$
$$E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 2,997 \cdot 10^8 / 5,5 \cdot 10^{-7} = 3,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 3,6 \cdot 10^{-19} / 1,602 \cdot 10^{-19} = 2,3 \text{ eV}$$

Ekvivalentní energie 1 u:

$$m = u = 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ kg}; c = 2,997 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$
$$E = m c^2 = 1,6606 \cdot 10^{-27} (2,997 \cdot 10^8)^2 = 1,492 \cdot 10^{-10} \text{ J} = 1,492 \cdot 10^{-10} / 1,602 \cdot 10^{-19} = 931,3 \text{ MeV}$$

## 2. Radioaktivita

### 2.1. Hmotnostní podmínka

Základní hmotnostní podmínka radioaktivity:

$$M(X) > M(Y) + M(\text{ČÁSTIC})$$

Energie uvolněná při radioaktivní přeměně:

$$E_{\text{přeměny}} = E_{\text{kin}}(Y) + E_{\text{kin}}(\text{ČÁSTIC}) + E_{\gamma}$$

Příklad:

$^{12}\text{C}$  (6 p, 6 n),  $m(\text{p}) = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ;  $m(\text{n}) = 1,6750 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ;  $m(\text{e}) = 9,1095 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ ;  $c = 2,997 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ;  $u = 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

teoretická  $m(^{12}\text{C}) = 6 m(\text{p}) + 6 m(\text{n}) + 6 m(\text{e}) = 2,0091 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$

skutečná  $m(^{12}\text{C}) = 12 u = 1,9927 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$

$\Delta = 1,9927 \cdot 10^{-26} - 2,0091 \cdot 10^{-26} = -1,6407 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$

$E_{\nu} = 1,6407 \cdot 10^{-28} \cdot (2,997 \cdot 10^8)^2 = 1,4736 \cdot 10^{-11} \text{ J} = 1,4736 \cdot 10^{-11} /$

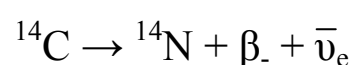
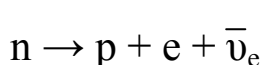
$1,602 \cdot 10^{-19} = 92 \text{ MeV}$

$\epsilon = 9,2 \cdot 10^7 / 12 = 7,7 \text{ MeV}$

**Zajímavost:** Při vzniku 12g (1 mol)  $^{12}\text{C}$  z p a n, by se uvolnilo  $1,4736 \cdot 10^{-11} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} = 8,9 \text{ TJ}$ , rozštěpením 12g uranu se uvolní asi **1 TJ**.

### 2.2. Druhy radioaktivních přeměn

**A) Přeměna  $\beta$ .**



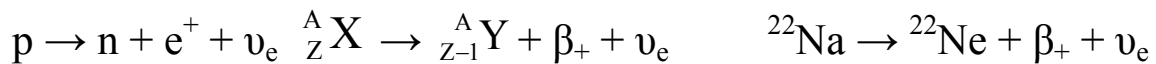
měříme



Energie se rozdělí mezi jádro (málo), elektron a  $\bar{\nu}_e$  náhodně, spektrum je proto spojité, část vznikajících jader může být excitovaná.

**Příklad:**  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{35}\text{S}$

## B) Přeměna $\beta_+$

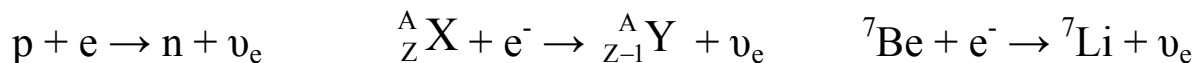


Platí stejné energetické zásady jako u  $\beta_-$  přeměny (spojité spektrum apod.).

Čistý  $\beta_+$  rozpad je vzácný, většinou probíhá spolu s elektronovým záchytem (EZ). Měří se pomocí anihilačních fotonů a ionizačních účinků  $e^+$ :

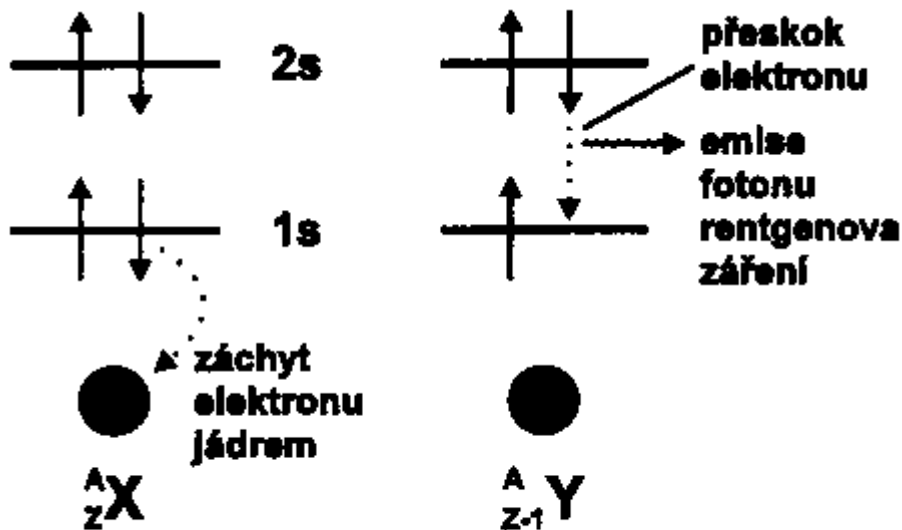
$e^+ + e^- \rightarrow 2 \gamma$ ,  $E = 2 m_e c^2 = 1,02 \text{ MeV}$  t. j. **0,51 MeV** na jedno kvantum  $\gamma$

## C) Elektronový záchyt (EZ)



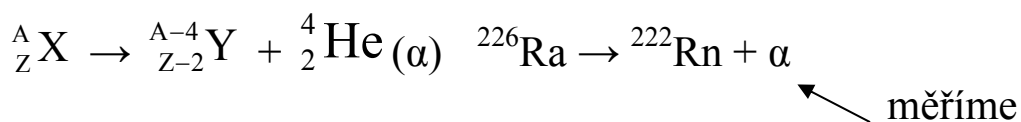
Po EZ dochází k následným dějům pomocí kterých se tato radioaktivita měří: zaplňování vakancí ve slupkách K či L  $\rightarrow$  emise RTG fotonů či Augerových elektronů (elektrony vyražené RTG zářením z vyšších slupek elektronového obalu, mají diskrétní energii,  $E_{\text{aug}} = E_{\text{RTG}} - E_{\text{vaz.}}$ ). Měří se RTG fotony.

Použití v medicíně:  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{11}\text{C}$



Obrázek 13: K výkladu elektronového záchytu.

#### D) Přeměna $\alpha$

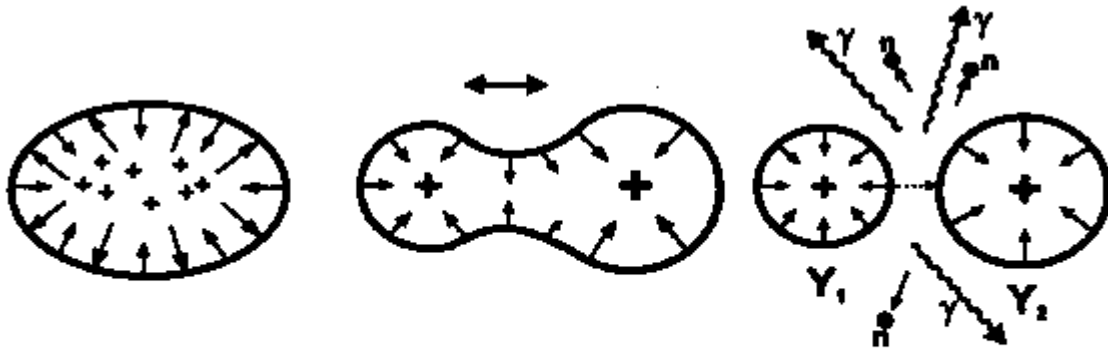


Alfa částice je velice stabilní a proto je její emise výhodná, zvláště u těžších prvků.

Na rozdíl od spektra  $\beta$  je spektrum  $\alpha$  spojité ale stejně jako při  $\beta$  rozpadu vzniká část jader excitovaná.

#### E) Samovolné štěpení (SŠ)

Je-li splněna hmotnostní podmínka, rozštěpí se jádro těžší na dvě lehká plus dva až tři neutrony. Existuje ale i bezneutronové štěpení.



**Obrázek 16:** Průběh samovolného štěpení jádra.

## 2.3. Kinetika radioaktivních přeměn

- za dostatečně krátký časový interval se přemění vždy stálá část z přítomného počtu ( $N$ ) atomů radioaktivního nuklidu (radionuklidu)

$$(dN / N) / dt = \lambda$$

$\lambda$  [ $s^{-1}$ ] – přeměnová konstanta

**Příklad:**  $\lambda = 1 \cdot 10^{-3} s^{-1}$  – z přítomného počtu RN se přemění každou sekundu 1 / 1000 atomů

**Tabulka 9: Přeměnové konstanty a poločasy některých radioaktivních nuklidů.**

Nuklid	$\lambda$ ( $s^{-1}$ )	poločas
$^{238}\text{U}$	$4,87 \cdot 10^{-18}$	$4,51 \cdot 10^9$ roků
$^{14}\text{C}$	$3,84 \cdot 10^{-12}$	5736 roků
$^{137}\text{Cs}$	$7,23 \cdot 10^{-10}$	30 roků
$^{131}\text{I}$	$9,93 \cdot 10^{-7}$	8,1 dní
$^{211}\text{At}$	$2,67 \cdot 10^{-5}$	7,2 hodin
$^{223}\text{Fr}$	$5,25 \cdot 10^{-4}$	22 minut
$^{262}\text{Db}$	0,0204	34 s
$^{263}\text{Sg}$	0,77	0,9 s

Rychlost přeměny **závisí na:**

- výchozím a konečném stavu jádra
- vlnové funkci obou jader
- na parametrech slabé, silné a elektromagnetické interakce

**nezávisí na:**

- tlaku, teplotě, koncentraci, chemické formě

Aktivita: rychlost přeměny radioaktivního nuklidu

$$A = dN / dt$$

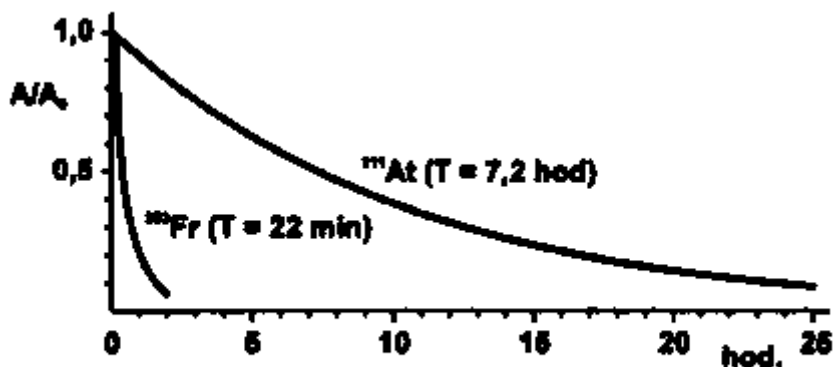
$$A = \lambda \cdot N$$

- závisí na počtu radioaktivních atomů v radioaktivní látce
- rozměr  $s^{-1}$
- jednotka 1 becquerel (Bq), násobné kBq, MBq, GBq apod.
- měrná aktivita: vztaženo na m, V, c apod.

Časová změna aktivity:

$$-dN / dt = \lambda N \rightarrow N = N_0 e^{-\lambda t} \rightarrow A = A_0 e^{-\lambda t}$$





**Obrázek 21: Časový průběh aktivity.**

- aktivita RN klesá s časem exponenciálně, rychlost poklesu je dána konstantou  $\lambda$ .

Poločas přeměny:  $A = A_0 / 2 \rightarrow A_0 / 2 = A_0 e^{-\lambda t}$   
 $1 / 2 = e^{-\lambda t}$   
 $\ln(1 / 2) = -\lambda t$   
 $-\ln 2 = -\lambda t$   
 $t = \ln 2 / \lambda$   
 **$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$**

Měření poločasu rozpadu z úbytku aktivity lze jen u krátkodobě žijících radionuklidů. Jinak se poločas rozpadu počítá z aktivity radionuklidu o známé hmotnosti (měrné aktiviy).

Radionuklid o hmotnosti  $m$  obsahuje:  $N = n N_A$   
 $N = (m N_A) / A_r$   
 $A = (\lambda m N_A) / A_r$

Pak z  $\lambda$  spočítáme  $T_{1/2}$ , popřípadě se znalosti  $\lambda$  spočítáme  $m$ .

Příklad využití vztahu  $A = A_0 e^{-\lambda t}$ :

- uhlíková metoda  $^{14}\text{N} (n, p) ^{14}\text{C}$  – vysvětlit tento druh zápisu
- $^{14}\text{C}$  se během minut až hodin oxidují na  $\text{CO}_2$
- rozdělení mezi rostliny, organismy, oceány
- rovnováha 15,3 přeměny za minutu v 1g C živé hmoty

- po smrti konec rovnováhy, citlivost asi do 50 000 roků ( $T_{1/2} = 5,7$  tisíc roků)
- měří se dřevo, uhlíky, textil, kůže
- moderní metoda: urychlovačová hmotnostní spektrometrie, použitelná až do 100 000 roků
- stačí i 0,05 mg vzorku, ve vakuu se vzorek bombarduje ionty  $Cs^+$  za vzniku  $^{14}C^-$  (izobarický  $^{14}N$  záporné ionty netvoří) poté se ionty  $^{14}C^-$  dostávají do prostoru s Ar, vzniká  $^{14}C^{3+}$  a vstupují do hmotnostního spektrometru.
- stejná metoda se používá ke stanovení obsahu př.:  $^{10}Be$  (mořské sedimenty, polární led),  $^{36}Cl$  a  $^{129}I$  (podzemní vody),  $^{27}Al$  (mořské sedimenty).

## 2.4. Přírodní RN

**Přirozeně se vyskytující radioaktivní prvky:** přírodní X umělé (není mezi nimi rozdíl)

1.  $T_{1/2} > 10^8$  let, vznikly při syntéze prvků ve vesmíru

**Tabulka 10:** Některé přírodní radioaktivní nuklidy s velkými poločasy přeměny

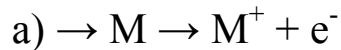
Nuklid	Poločas (roků)	Zastoupení v příslušném prvku (%)
$^{40}K$	$1,27 \cdot 10^{10}$	0,012
$^{87}Rb$	$4,7 \cdot 10^{10}$	27,85
$^{88}Sr$	$> 3 \cdot 10^{16}$	82,56
$^{115}In$	$6 \cdot 10^{14}$	95,77
$^{138}Ba$	$> 1 \cdot 10^{15}$	71,66
$^{147}Sm$	$6,7 \cdot 10^{11}$	14,97
$^{159}Tb$	$> 5 \cdot 10^{16}$	100
$^{186}W$	$> 6 \cdot 10^{15}$	28,41
$^{187}Re$	$5 \cdot 10^{10}$	0,93
$^{209}Bi$	$2,7 \cdot 10^{17}$	100
$^{232}Th$	$1,39 \cdot 10^{10}$	100
$^{235}U$	$7,13 \cdot 10^8$	0,715
$^{238}U$	$4,51 \cdot 10^9$	99,274

2.  $T_{1/2} < 10^8$  let, vznikají jako produkty přeměny mateřských nuklidů z radioaktivních řad a jadernými reakcemi v zemské atmosféře působením kosmického záření ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{10}\text{Be}$  aj.)

## 3. Ionizující záření

### 3.1. Vlastnosti ionizujícího záření

Energie záření ( $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$  apod.) keV – MeV, ionizační energie atomů a molekul  $< 25$  eV proto **ionizující záření**.

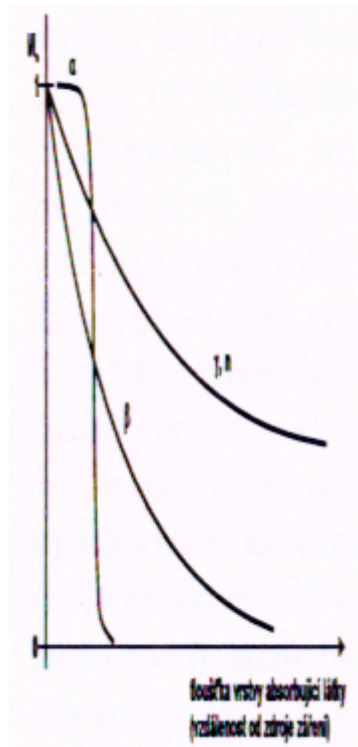


Rychlost asi  $10^{-16} - 10^{-15}$  s, poměr a) a b) 1:2, elektrony způsobují další sekundární ionizaci a excitaci. Excitace je mnohonásobná a do vysokých excitačních stavů (na rozdíl od UV)

Pojmy a veličiny: ionizující záření, jaderné záření (pouze při radioaktivních přeměnách), radioaktivní záření (nesprávné, záření není radioaktivní {kromě n})

**Absorpce záření** – postupné odevzdávání energie až do stavu kdy už není schopno dále ionizovat

**Dosah záření** – tloušťka vrstvy která úplně absorbuje záření



### Absorpční křivky:

**Dávka záření** – energie sdělená ionizujícím zářením (energie získaná od všech primárně i sekundárně ionizujících částic) malému objemu látky

$$D = d\varepsilon / dm$$

Rozměr je  $J \cdot kg^{-1}$ , jednotkou Gray (Gy), 1 Gy = energie 1 J absorbovaná v 1 kg látky.

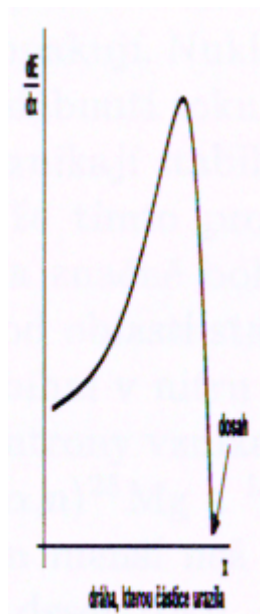
**Rozsah dávek:**  $10^{-6} - 10^{-2}$  Gy při monitorování dávek v životním prostředí,  $10^{-4} - 1$  Gy při monitorování dávek u profesionálních pracovníků se zářením,  $10^{-1} - 10^2$  Gy v léčebném použití záření,  $10^{-1} - 10^4$  Gy v radiobiologii a  $10^2 - 10^5$  Gy v radiační chemii a technologii.

**Dávkový příkon** – rychlost s jakou je látce energie sdělována, rozměr  $W \cdot kg^{-1}$ , jednotka  $Gy \cdot s^{-1}$

$$\dot{D} = dD / dt$$

**Lineární přenos energie** – používá se při posuzování biologických účinků IZ a udává rozložení sdělené energie podél dráhy částice, rozměr  $J \cdot m^{-1}$ , běžně  $keV \cdot \mu m^{-1}$

$$L = dE / dx$$



(tzv Braggova křivka)

Lineární přenos energie ve vodě pro různé druhy záření

záření	keV, $\mu\text{m}^{-1}$
$\gamma$ záření $^{60}\text{Co}$ (1,17 a 1,31 MeV)	0,22
rtg záření (200 keV)	1,7
rtg záření (50 keV)	6,3
elektrony (záření $\beta$ ) (1–2 MeV)	0,2
elektrony (10 keV)	0,3
elektrony (100 eV)	20
protony (10 MeV)	4,7
záření $\alpha$ (5 MeV)	40
jádra vzniklá jaderným štěpením (100 MeV)	1800

### 3.2. Zdroje IZ

1. **aparturní** – záření vzniká jen během provozu zařízení
2. **radionuklidové** – emitují záření nepřetržitě

**Zdroje  $\gamma$  a RTG záření:**  $\gamma$ :  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ;  
RTG: RTG lampy,  $^{109}\text{Cd}$ , radionuklidy generující brzdné záření při absorpci  $\beta$  záření, urychlovače elektronů

**Zdroje elektronů:**  $^{90}\text{Sr}$  /  $^{90}\text{Y}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{147}\text{Pm}$  ; urychlovače elektronů

**Zdroje pozitronů:**  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{68}\text{Ge}$

**Zdroje těžkých kladných částic:**  $\alpha$ :  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  
urychlovače částic

**Zdroje neutronů:** radionuklidové zdroje založené na reakci ( $\alpha$ , n) a samovolném štěpení, neutronový generátor ( $^3\text{H}$  (d, n)  $^4\text{He}$ ), jaderný reaktor

### 3.3. Ochrana před IZ

Spočívá v zeslabení dávky záření na hodnotu při níž je riziko pro lidský organismus sníženo na zanedbatelnou hodnotu.

#### Metody ochrany před IZ:

- udržováním patřičné vzdálenosti od zdroje záření  $\sim 1 / I^2$  (důležité u  $\gamma$  záření)
- odstíněním záření (všude kromě  $\alpha$  záření, u  $\beta$  stačí 1-2 cm skla, plexiskla, u  $\gamma$  olovo, železobeton, beton s barytem ( $\text{BaSO}_4$  – těživec), pozitrony se stíní jako  $\gamma$ , stejně se stíní  $\gamma$  při reakci pomalých neutronů s jádry atomů, neutrony se zpomalují př. parafínem)
- nejkratší dobou pobytu v prostoru kde záření působí

### 3.4. Detekce IZ

- IZ není vnímatelné lidskými smysly

- registruje se na základě dějů které vyvolává při absorpci ve vhodné látce
- důsledky těchto dějů se většinou elektronicky převádějí na pozorovatelné signály
- elektronický způsob detekce vyžaduje zařízení sestávající z několika částí
- část citlivá na záření se nazývá detektor záření (energie záření se mění na elektrické či optické signály a dále se zpracovávají ( zesílení, integrace)
- zpracované signály se přivádějí na registrační jednotku (pulsní {zobrazují se přímo impulsy} či integrující režim {počet impulsů za čas} tzv. dozimetry – udávají dávkový příkon př.  $\mu\text{Gy hod}^{-1}$ )
- většina detektorů neměří IZ se 100% účinností, pro četnost R platí:  $R = \eta A$  ( $\eta$  – účinnost  $< 1$ ; A – aktivita v Bq)
- zařízení které rozlišuje energii záření podle výšky impulsů – spektrometr záření
- chyba měření vzorku je tím menší čím větší počet impulsů zaznamenanáme

K detekci ionizujícího záření se běžně užívají tyto [sekundární projevy absorpce](#):

- fotografické účinky
- ionizace plynů
- luminiscence
- schopnost zvyšovat elektrickou vodivost některých materiálů
- změna struktury materiálu

Podle toho lze rozdělit detektory ionizujícího záření do [pěti základních skupin](#):

1. fotografický film
2. ionizační komora, proporcionální detektory, Geiger-Müllerovy detektory
3. fluorescenční stínítka, scintilační detektory, termoluminiscenční detektory
4. polovodičové detektory



## 5. stopové detektory částic

Důležitými charakteristikami všech typů detektorů jsou:

- účinnost
- linearita
- energetická proporcionalita
- rozlišení

### Účinnost:

Účinnost detektoru popisuje možnosti detektoru zaznamenávat různé druhy záření o různých energiích, která na něho dopadají. Ideální je stav, kdy počet částic dopadajících na snímač je roven počtu impulsů registrovaných detektorem.

### Linearita:

Proces konverze jednotlivých částic na elektrické pulsy je extrémně rychlý - řádově několik mikrosekund. Pokud je vysoký tok částic, může se stát, že částice přicházející do detektoru není zaznamenána, protože detektor ještě zpracovává částici předcházející. Doba potřebná pro registraci částice (přeměnu na elektrický puls) se označuje jako mrtvá doba detektoru ( $\tau$ ). Část částic, které mohou být náležitě zpracovány, je popsána linearitou detektoru. Jednotlivá částice s energií  $E$ , která vstoupí do detektoru, produkuje elektrický puls  $V$ , takže částice, které dopadají na detektor v počtu  $I$  částic za sekundu vyvolají vznik napěťových pulsů v počtu  $R$  pulsů za sekundu. Detektor považujeme za lineární, dokud trvá přímá úměra mezi  $R$  a  $I$ .

Jelikož je detektor po určitou dobu  $\tau$  "mrtvý", bude měřené množství pulsů  $R_m$  vždy nižší než skutečné množství pulsů  $R_t$ :

$$R_t = \frac{R_m}{1 - R_m \tau}$$

### Průměrná mrtvá doba činí:

- 200  $\mu\text{s}$  u Geiger-Müllerova detektoru
- 0,23  $\mu\text{s}$  u scintilačního detektoru s krystalem NaI (Tl)
- 0,027  $\mu\text{s}$  u scintilačního detektoru s krystalem YAP (Ce)
- 0,001  $\mu\text{s}$  u polovodičových detektorů

### **Energetická proporcionalita:**

Jedná se o úměrnost signálu detektoru k energii dopadající částice. Velikost výstupního signálu je závislá na proudu vzniklém v čítači a tento proud je závislý na počtu ionizačních přeměn vedoucích ke vzniku pulsu. Jestliže počet ionizačních přeměn bude úměrný energii dopadajících částic, velikost výstupního napětí bude rovněž úměrná energii dopadajících částic. Detektor bude proporcionalní, pokud je velikost výstupního napětí detektoru  $V$  úměrná energii  $E$  dopadajících částic.

### **Rozlišení**

Je to schopnost detektoru rozlišit částice různých energií. V proporcionalně pracujícím detektoru způsobí částice o energii  $E$  výstupní puls o napětí  $V$ . Prakticky budou tedy částice o stejné energii produkovat výstupní pulsy o stejném napětí

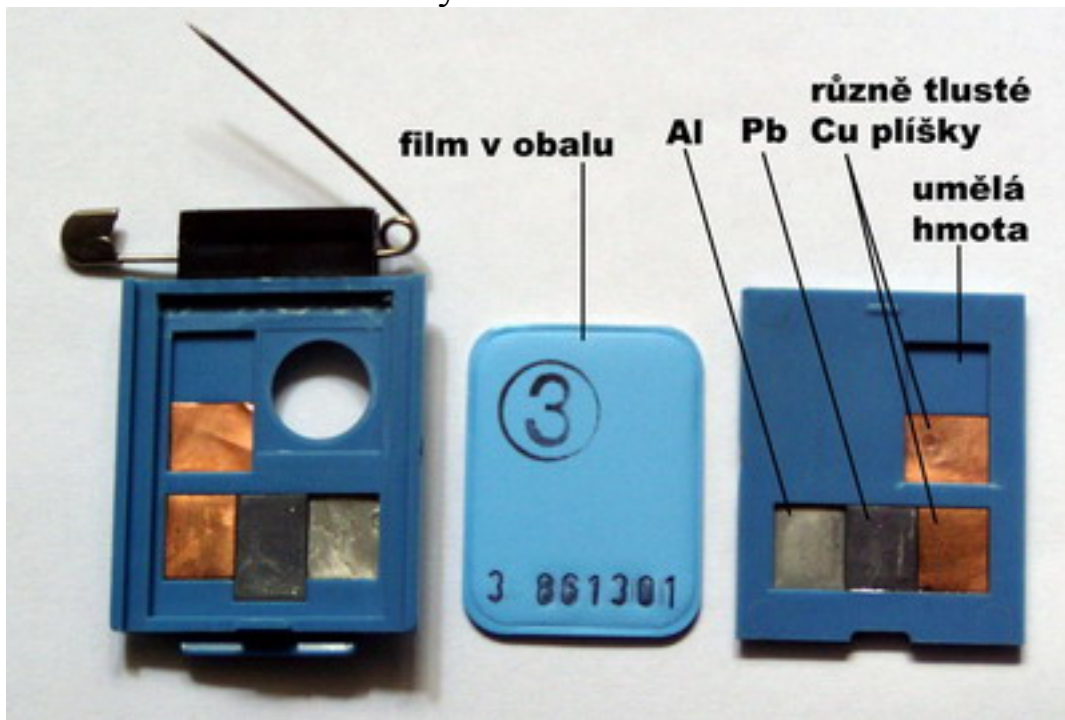
### **Fotografický film**

Fotografická detekce ionizujícího záření je založena na tom, že ionizující záření, stejně jako viditelné světlo, vyvolává ve fotografické emulzi (krystalky Agar v želatině) latentní obraz, který lze zviditelnit chemickým vyvoláním. Ozářená místa emulze vykazují po vyvolání zčernání, jehož intenzita je úměrná počtu částic, které na emulzi působily. Používají se k detekci RTG záření, záření  $\gamma$  a

neutronů. Neutrony, které sami na fotografickou emulzi nepůsobí, je třeba převést na detekci ionizujících částic. Například překrytím fotografické emulze kadmiovou fólií, v níž se pomalé neutrony zachycují reakcí  $^{113}\text{Cd} (n, \gamma) ^{114}\text{Cd}$  a vzniklé fotony pak způsobují zčernání emulze.

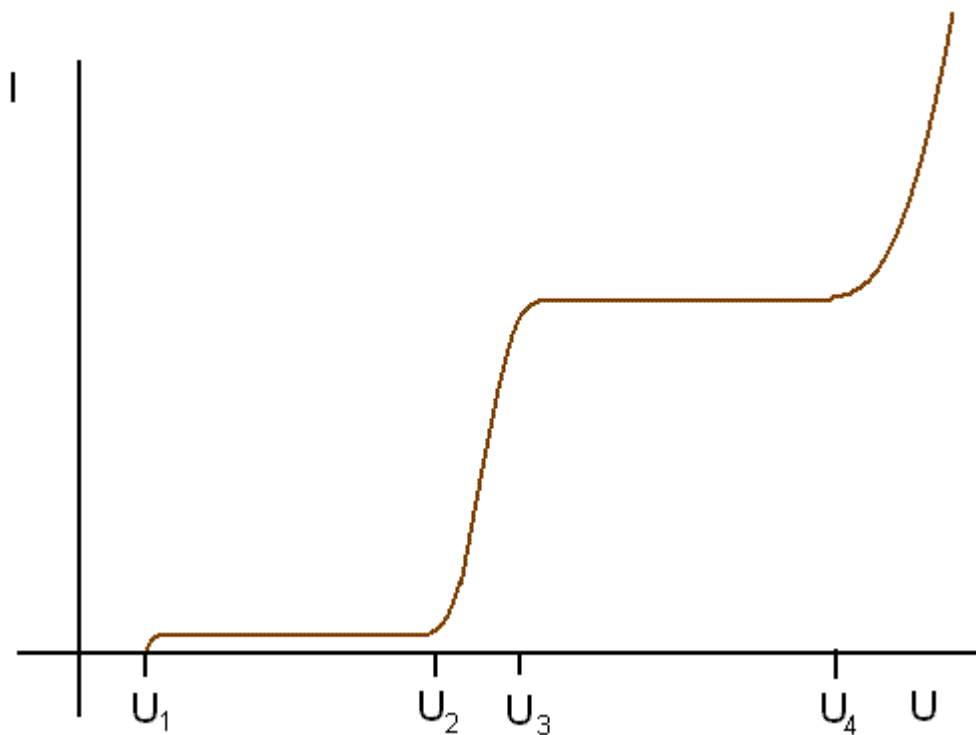
Fotografická detekce ionizujícího záření se používá v **osobní dozimetrii** pracovníků s ionizujícím zářením. A v různých **radiografických metodách**. Osobní filmový dozimetr obsahuje film v papírovém obalu, který je uložen v plastické kazetě. Na vnitřních stěnách kazety, jsou upevněny měděné a olověné proužky, které umožňují přibližně určit energii záření tím, že různě absorbují záření dopadající na film. Dozimetr je připevněn na pracovním oděvu a nepřetržitě registruje záření, obvykle po dobu jednoho měsíce. Po vyvolání filmu se dávka záření určí z intenzity zčernání filmu.

**Obrázek:** Osobní filmový dozimetr



Autoradiografické metody jsou významné tím, že poskytují informace o rozložení radioaktivity ve zkoumaném objektu. To je velmi užitečné v biologických studiích, kde se zjišťuje rozložení radioaktivních látek v živočišných orgánech, částech rostlin a buněčných strukturách. Zkoumaný radioaktivní objekt se na určitou dobu přiloží na film, který se pak vyvolá.

Fotografická detekce ionizujícího záření se také používá v průmyslové radiografii a v lékařské rentgenové diagnostice.



### ***Plynové ionizační detektory***

Všechny detektory mají za základ nádobu s tenkým, málo absorbujícím vstupním okénkem a dvěma elektrodami uvnitř. Detektor je plněn vzácnými plyny (argon, xenon). Po určité době budou vzniklé iontové páry rekombinovat a přejdou zpět do základního stavu. V případě, že je na elektrody vloženo určité napětí, budou elektrony přitahovány k anodě a ionty ke katodě a sníží se tím rozdíl potenciálů. Velikost vzniklého napěťového impulsu závisí na napětí mezi elektrodami.

Závislost počtu elektronů vzniklých v komoře působením ionizujícího záření na napětí mezi elektrodami lze vyjádřit graficky. Je-li hodnota  $U$  menší než  $U_1$  bude část elektronů a iontů rekombinovat ještě před zachycením na elektrodách. V oblasti napětí  $U_1$ - $U_2$  dopadnou všechny elektrony na anodu a ionty na katodu - jejich počet závisí pouze na počtu absorbovaných částic. V oblasti, kde je napětí mezi elektrodami vyšší než  $U_2$ , budou mít volné elektrony dostatečnou energii, aby na cestě k anodě ionizovaly další atomy plynu a probíhá tzv. lavinová ionizace. Koeficient plynového zesílení

(A) udává kolikrát více párů dopadlo na elektrody než vzniklo účinkem ionizujícího záření.

### **Ionizační komora:**

Ionizační komora pracuje v oblasti  $U_1-U_2$  ( $A = 1$ ), ionizační proud je úměrný energii ionizujícího záření. Napětí nutné k dosažení nasyceného proudu závisí na intenzitě záření. Citlivost komory závisí na vlnové délce a stejně tak i absorpce záření v plynu. K plnění se používá těžkých vzácných plynů (Ar, Kr).

### **Proporcionální a Geiger-Müllerův detektor:**

Jedná se o detektory pracující v oblasti  $U_3-U_4$ . Počet vzniklých párů elektron-iont je úměrný energii ionizujícího záření. Pokud je koeficient plynového zesílení konstantní je elektrický napěťový impuls na výstupu úměrný absorbované energii ionizujícího záření a detektor dovoluje rozlišit ionizující záření s různými energiemi.

Vznik lavin elektronů je v proporcionálním detektoru lokální záležitostí - vznikají v té části, kde bylo ionizující záření pohlceno. Vyhasnutí lavin proběhne aniž by se rozšířili do celého objemu. Plynové zesílení tohoto Geiger-Müllerova detektoru je kolem  $10^7$ .

**Obrázek:** Geiger-Müllerův detektor



## ***Luminiscenční detektory***

### **Fluorescenční stínítka:**

Při ozáření některých látek ionizujícím zářením může dojít k uvolnění elektronů z valenčního pásu a přechodu do pásu vodivostního a **při zpětném přechodu může vzniknout viditelné záření**. Tento jev se pak využívá k visuelní detekci ionizujícího záření. Jako fluoreskujících látek se používá wolframan vápenatý, křemičitan zinečnatý nebo sirník zinečnatý. Ačkoliv existuje závislost mezi intenzitou fluorescence a intenzitou dopadajícího svazku, používá se fluorescenčních stínítek hlavně při justaci přístrojů.

### **Scintilační detektory:**

V scintilačních detektorech je **převod ionizujícího záření na elektrický impuls dvojestupňový proces**. Prvním krokem je **vznik záblesku (emise světla) na vhodném krystalu** a druhým krokem je

uvolňování elektronů na fotonásobiči a jejich detekce a převod na elektrický impuls.

Ionizující záření, dopadající na uzemněný scintilační krystal detektoru, uvolní elektron, který při pohybu krystalem přivede do excitovaného stavu desítky atomů. Zpětný přechod do základního stavu je doprovázen emisí světla, jehož vlnová délka nemusí nutně ležet ve viditelné oblasti, ale musí být vhodná k uvolňování elektronů z fotokatody.

Scintilačním krystalem emitovaný foton dopadne na světlocitlivou katodu a uvolní z ní určitý počet ( $n$ ) fotoelektronů. Tyto dopadají na nejbližší dynodu (parabolická elektroda) a každý z nich vyprodukuje jistý počet  $R$  sekundárních elektronů. Na druhou dynodu dopadá již  $nR$  elektronů, na třetí  $nR^2$  elektronů atd. Při počtu dynod  $m$  vzroste počet primárních elektronů na  $nR^m$ , kde  $R^m$  je koeficient zesílení fotonásobiče. Mezi jednotlivými dynodami je udržováno napětí 100-200 V a na výstupu z fotonásobiče je impuls napětí přímo úměrný energii absorbovaného ionizujícího záření. V běžných detektorech je počet dynod 8-15, a koeficient zesílení je  $10^7$ - $10^8$ .

**Obrázek:** Fotonásobič



Jako scintilačního krystalu se nejčastěji používá krystal **NaI aktivovaný 1% Tl**. Thallium vytváří v pásové struktuře krystalu hladinu nečistot, tzv. fluorescenční centra. Pro nízkoenergetická RTG záření (3-20 keV) není tento krystal vhodný a alternativně se používají monokrystaly  $\text{YAlO}_3$  aktivované Ce (YAP:Ce). Tento krystal může být v tenčí destičce a je mnohem stabilnější. Podstatný je i rozdíl v délce scintilačních záblesků - u NaI je to 230 ns, u YAP je to pouze 27 ns. Maximální intenzita fluorescenčního pásu NaI je na vlnové délce 410 nm, u krystalu YAP 350 nm. **Fotokatoda v scintilačních detektorech je zpravidla antimon-cesiová.**

**Obrázek:** Scintilační krystal z NaI dotovaný thaliem



### ***Polovodičové detektory***

V těchto detektorech je jednostupňová detekce ionizujícího záření prováděna pevnou látkou, ve které dokáže dopadající kvantum **generovat dvojici nábojů** a ty jsou schopny rychlého pohybu k elektrodám, kde vyvolají elektrický impuls. Tato pevná látka je umístěna mezi dvěma elektrodami pod vysokým napětím. **Je to vlastně typ ionizační komory, která je místo plynem vyplněna krystalem.** Použitý krystal musí mít v zásadě tyto vlastnosti:



- vysoký odpor, který zajišťuje sběr nábojů polem vysokého napětí a snižuje šum ze zbytkových proudů
- dovoluje prodloužit dobu životnosti vzniklých nábojů
- umožňuje vysokou pohyblivost nábojů
- má malou šířku zakázané zóny (předpoklad dobrého energetického rozlišení)
- velkou absorpční schopnost

Těmto podmínkám vyhovují polovodičové materiály jako křemík a germanium. Tyto materiály jsou zpravidla driftované lithiem, které napomáhá k záchytu dopadajících fotonů. Jejich stabilitu je však nutno zajistit teplotami kapalného dusíku.

Si(Li) detektor je tvořen monokrystalem p-typu křemíku tloušťky několik mm, který je pod napětím 300-1000 V. Vysoká koncentrace Li atomů na jeho okrajích tvoří oblast n-typu, kdy z jedné strany je kontakt zlatý a z druhé strany je tzv. Schootkyho bariéra (p-i-n dioda). Při vstupu fotonu dojde ke vzniku mraku elektronových párů, jejichž počet je přímo úměrný energii dopadajícího kvanta. Elektrony jsou pak směřovány ven z krystalu díky rozdílu potenciálů na čítací obvod. Na rozdíl od jiných typů detektorů, neexistuje zde žádné vnitřní zesílení, takže výstupní signál je velmi slabý.

Výhodou těchto detektorů je možnost připojení na vícekanálový analyzátor, vysoká účinnost ve sběru pulsů a velké úhly při sběru dat. Nevýhodou je dlouhá mrtvá doba.

Si(Li) krystaly pracují spolehlivě v oblasti asi 2-20 keV. V krátkovlnné oblasti však ztrácejí na účinnosti a jsou nahrazovány krystaly Ge(Li). Podmínkou je užití vysoce čistého germania, v opačném případě se radikálně zvyšuje mobilita Li.

Problém chlazení kapalným dusíkem lze odstranit při použití teluridu kadmia, který je schopen pracovat při pokojové teplotě, ale jeho nevýhodou je poměrně vysoký šum.

**Obrázek:** Germaniové jádro Ge(Li) detektoru



## **Stopové detektory částic**

Jsou látky v nichž těžká jádra či  $\alpha$  záření vyvolávají mikroskopické poruchy v jejich struktuře. Nejčastěji se používá slída, různá skla, či organické polymery. Poruchy vznikají tím, že procházející částice vytvářejí podél své dráhy v pevné látce vysoce ionizované atomy. Tyto ionty se silně odpuzují a vzájemně vytlačují z původních poloh., čímž vzniká mikroskopická oblast s porušenou strukturou, tzv. **radiační stopa** (válcový kanálek o průměru 1 – 10 nm). Lze je zviditelnit chemickým leptáním, protože v místech poruch je ozářená látka náchylnější k chemické korozi. Počet stop je přímo úměrný počtu částic, které dopadly na detektor.

Stopové detektory se používají v dozimetrii  $\alpha$  záření, zejména k měření dávek záření způsobených radonem a jeho dceřinými produkty. Lze je použít i k dozimetrii neutronů. Pro tento případ se dozimetr překrývá fólií z uranu mírně obohaceného izotopem  $^{235}\text{U}$ , který se neutrony štěpí a štěpné fragmenty vyražené z fólie pak vyvolávají poruchy v detektoru. Pokryje-li se detektor vrstvou boru, lze neutrony registrovat prostřednictvím  $\alpha$  částic vznikajících reakcí  $^{10}\text{B} (n, \alpha) ^7\text{Li}$ .

Stopové detektory se používají také k registraci těžkých iontů v kosmickém záření a k měření dávek, kterým jsou vystaveny posádky kosmických letů.

### 3.5. Biologické účinky IZ

#### Základní pojmy:

Dávka  $D$ :  $D = dE/dm$  [Gy]

Dávkový příkon  $\dot{D}$ :  $\dot{D} = D/t$  [Gy/s]

Ekvivalentní dávka  $H_T$ :  $H_T = w_R * D_{TR}$  [Sv]

Druh záření	$w_R$
fotony a elektrony všech energií	1
neutrony 10 keV	5
neutrony 10 – 100 keV	10
neutrony 0,1 – 2 MeV	20
neutrony 2 – 20 MeV	10
záření $\alpha$	20

Efektivní dávka  $H_f$ :  $H_f = \sum w_T * H_T$  [Sv]

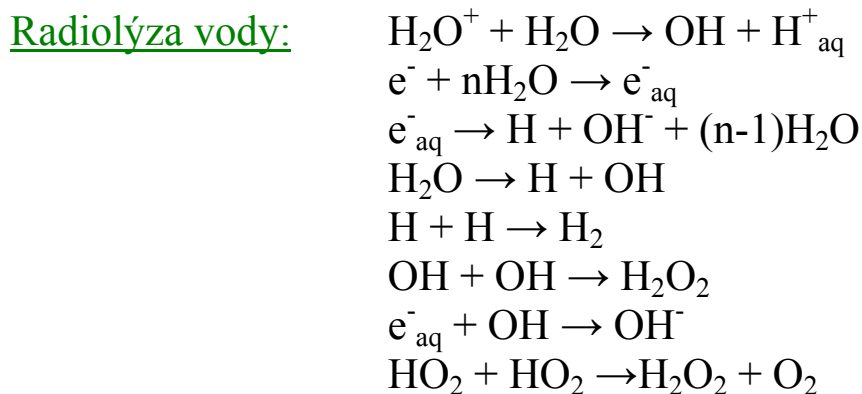
Tkáň, orgán	$w_T$
gonády	0,20
červená kostní dřeň	0,12
tlusté střevo	0,12
plíce	0,12
žaludek	0,12
močový měchýř	0,05
mléčná žláza	0,05
játra	0,05
jícen	0,05
štítná žláza	0,05

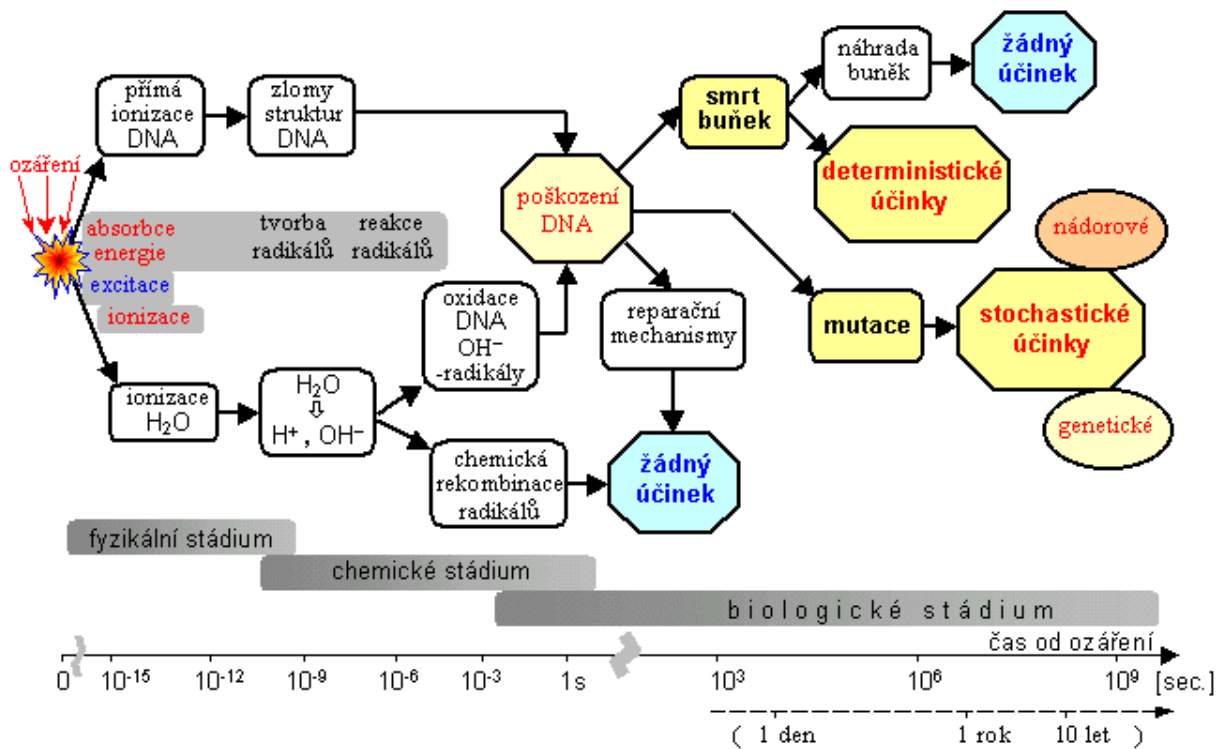
kůže	0,01
povrchy kostí	0,01

Účinky IZ se projevují ve větší či menší míře u všech živých organismů. Závažnost účinků závisí na dávce a druhu organismů.

**Přímé účinky:** změna biologicky důležité makromolekuly (nukleových kyselin) přímým zásahem částic IZ či sekundárními částicemi

**Nepřímé účinky:** souvisí s radiolýzou vody (změny způsobené radikály, peroxidem vodíku a hydratovaným elektronem (vysušené enzymy vykazují menší poškození než roztoky enzymů))



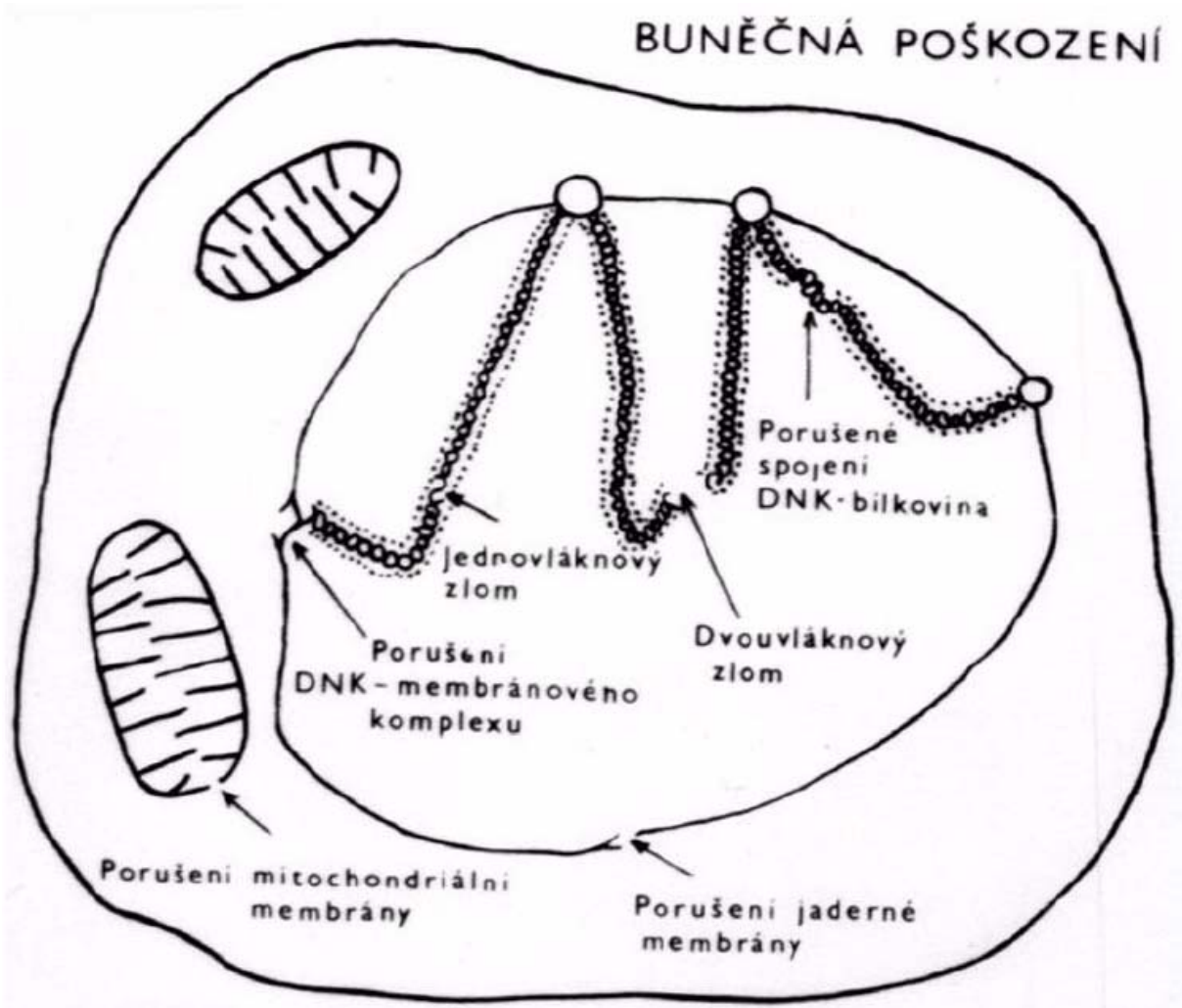


### Poškození na buněčné úrovni:

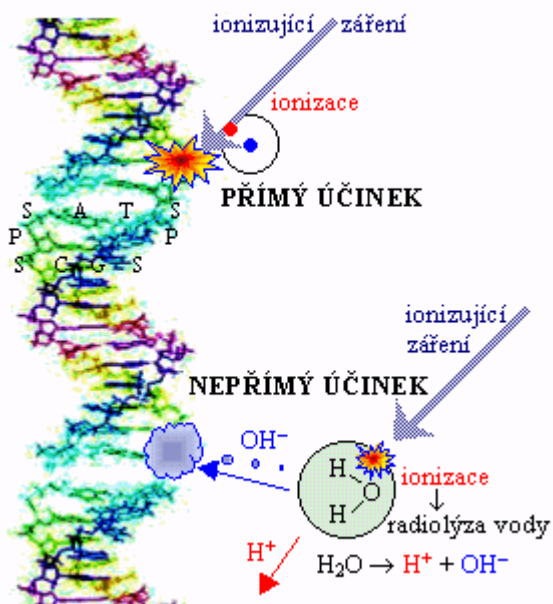
- změny ve struktuře a biosyntéze DNA
- chybná syntéza enzymů
- chybně syntetizované bílkoviny (chovají se cize a jsou toxické)
- změny v propustnosti buněčných membrán
- časem poruchy dělení, smrt buňky

Větší rozmnožovací schopnosti, malá diferencovanost = výraznější poškození

# BUNĚČNÁ POŠKOZENÍ



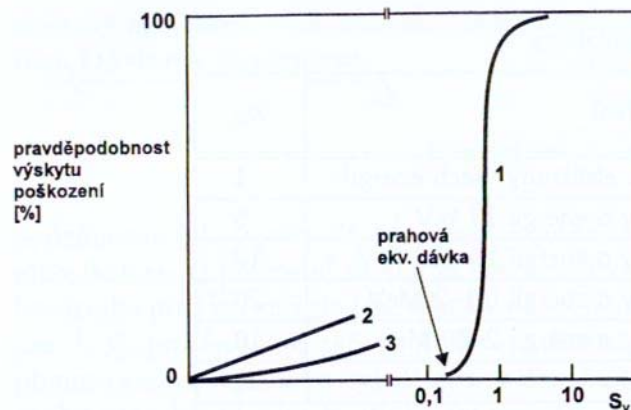
## Molekula DNA



## Účinky IZ na lidský organismus

## Nestochastické:

- projeví se po ozáření IZ během krátké doby
- je postiženo současně mnoho buněk
  
- nemohou se uplatnit všechny opravné procesy
- prahová dávka vyvolá poškození u 1 – 5% osob



Obr. 1

### a) akutní nemoc z ozáření:

- jednorázové ozáření celého těla vysokými dávkami
- poškození krvevorných orgánů, trávicího ústrojí a CNS
- ekvivalentní dávka 2 Sv
- projevuje se ve 3 fázích:
  - 1) **Nevolnost, skleslost, bolesti hlavy, zvracení, změny krevního obrazu**
  - 2) **Období latence** – přechodné ustoupení příznaků, je tím kratší čím větší byla absorbovaná dávka
  - 3) **Intenzivní rozvinutí počátečních příznaků** + padání vlasů, vnitřní krvácení, silná vnímavost vůči infekcím
- při ozáření ekvivalentní dávkou 6 Sv převládá **hematologická forma choroby** (poškození krevní dřeně, krvetvorby, krvavé průjmy, poruchy funkce střev)

- **ozáření ekvivalentní dávkou 50 Sv:** psychická dezorientace, zmatenost, křeče, bezvědomí, smrt během hodin až dnů v důsledku oběhového kolapsu, zástavy dýchání a poruch mozku
- **pravděpodobnost úmrtí:** 6 Sv 80%, 10 Sv 100%
- zlepšování stavu po 6 – 8 týdnech, uzdravení
- **dlouhodobé následky** (poruchy krvetvorby, poruchy funkce pohlavních orgánů, neplodnost, zvýšená vnímavost k infekcím a nádorovým onemocněním, trvalá slabost a únava)

#### b) lokální akutní poškození kůže:

- **radiační dermatitida** (zarudnutí až špatně hojitelné vředy)
- prahová dávka 3 Sv (výrazně se zvyšuje frakcionací dávky)

#### c) poškození plodu:

- **plod je nejcitlivější mezi 3. – 8. týdnem**
- mikrocefalie (špatně vyvinutý mozek), oční defekty, rozštěp patra, celkové zaostávání (mentální retardace, zakrsllost)
- prahová dávka 0,05 Sv

#### d) poruchy plodnosti:

- **přechodná aspermie** (porucha v tvorbě spermií)
- prahová dávka 0,1-1 Sv, od 3Sv trvalá aspermie
- u žen dávka do 1,5 Sv bez odezvy, sterilita od cca 3 Sv

#### e) zákal oční čočky:

- dlouhá doba latence
- prahová dávka cca 1,5 Sv (výrazně závisí na frakcionaci dávky)

#### Stochastické:

- poškození malého počtu buněk (i jediné)
- projeví se po ozáření jednou či více podprahovými dávkami
- vznik nádorových onemocnění (l.d. 10 – 40 let), leukémie (l.d. 5 – 20 let), genetické poškození další generace



- projeví se ve skupině náhodně
- pravděpodobnost vzniku poškození je tím menší, čím menší dávkou byla skupina ozářena
- rostoucí dávka záření ovlivňuje pouze pravděpodobnost vzniku poškození a nikoliv jeho závažnost
- lze odhalit jen sledováním velkého počtu osob
- 6400 osob v Hirošimě ozářeno ekvivalentní dávkou 1,2 Sv, za 25 let 11 případů leukémie navíc nad přirozený výskyt ve stejně velké neozařené skupině

Díky opravným mechanismům je vznik poškození při malých dávkách velmi málo pravděpodobný, přesto dosud převládá tzv. **konzervativní přístup:**

- stochastické účinky – mutace jediné buňky
- závislost na dávce podprahová
- předpokládá sčítání dávek, ignoruje opravné procesy

### **Moderní přístup:**

- buňka může poškození DNA opravit
- při ozáření dávkami pod 0,2 Gy nelze prokázat škodlivé účinky (kromě ranného vývoje plodu)
- u lidí ozářených při bombardování atomovými bombami dávkami menšími než 0,2 Gy zjištěna nižší úmrtnost na rakovinu a nebyl pozorován vyšší výskyt leukémie
- britští radiologové s celoživotní dávkou 1-5 Gy, radiologičtí pracovníci 0,5 Gy: žádný výskyt rakoviny navíc
- 28 000 pracovníků britských loděnic ozářeno dávkou 0,005 mSv: úmrtnost o 24% nižší
- kanadské ženy vyšetřované pomocí RTG na tuberkulózu, dávky 0,15 – 0,25 Gy: nižší úmrtnost na rakovinu
- Coloradská plošina, přirozené dávky záření 3x vyšší než USA průměr: úmrtnost na rakovinu o 15% menší

### **Ochranný efekt:**

- leukocyty ozářeny nejprve dávkou 0,02 Gy a pak 0,15 Gy – poloviční výskyt chromozomových aberací než po samostatné dávce 0,15 Gy

### **Hormeze** – stimulující účinky malých dávek IZ

- vyšší metabolická aktivita bakterií
- urychlení klíčení semen, vycházení, odnožování, růst, dřívější květenství, dozrávání
- prodloužení života myši (celoživotně ozařovány 8h denně 1mGy)
- u lidí: léčivé účinky radioaktivních koupelí (Jáchymov)
- léčí se především: revmatismus, degenerativní změny obratlů, inf. onemocnění nervového systému, poruchy vylučování k. močové, poruchy při vylučování žluči játry apod.

### **Léčení pomocí IZ:**

**Teleterapie** – dálkové ozařování především  $^{60}\text{Co}$  ( $5 \cdot 10^{13} - 10^{15}$  Bq)

**Kontaktní terapie** –  $\beta$ . zářič na povrchu těla ( $^{32}\text{P}$  či  $^{90}\text{Sr}$ )

**Brachyterapie** – tělesnými dutinami se zářič zavede k nádoru

**Endoterapie** – vpravení radionuklidového zářiče do postižené tkáně metabolickým procesem (štítná žláza  $\text{Na}^{131}\text{I}$  apod.)

**Radioimunoterapie** – RN je vázán na protilátku, selektivně se váže na spec. antigeny a receptory v nádorových buňkách

**Velikost dávek** – cca 60 Gy (frakcionace po 2 Gy)

**Nevýhoda  $\gamma$  ozařování** – ozařuje se i zdravá tkáň (různé směry ozařování)

### **Současné trendy:**

- ozařování urychlenými protony (vysoký lin. přenos energie na konci dráhy, 180 MeV dosah 15cm), v Japonsku  $^{12}\text{C}^{6+}$
- ozařování svazkem záporných pionů (nestabilní částice (doba života  $2,6 \cdot 10^{-8}$ s), vznikají při ozařování terče protony o  $E > 500$  MeV), po zpomalení dojde k zachycení v jádře a uvolnění 140 MeV = roztržení jádra
- bórová terapie  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$

### **Účinky IZ na hmyz:**

- 100x odolnější než obratlovci, smrtelné dávky  $10^3 - 10^4$  Gy
- nižšími dávkami lze hmyz **sterilizovat**
- radiační hubení hmyzu: potěmník v obilí, při 100 Gy dochází ke sterilizaci samečka ale k přímému usmrcení je třeba 5000 Gy
- ochrana starých dřevěných uměleckých předmětů (výhoda proti chemické sterilizaci)
- hubení hmyzu ve volné přírodě: vypouštění sterilizovaných samečků (nezanáší se do přírody insekticidy)

### Účinky IZ na mikroorganismy:

- jsou velmi odolné, smrtelné dávky  $10^3 - 10^4$  Gy
- radiační **sterilizace**: obvazový materiál, chirurgické potřeby, injekční stříkačky, jehly, umělé srdeční chlopně, apod)
- **radiační ozáření potravin**: dávka 30 – 70 kGy, potraviny jsou vakuované a zmrazené (masné výrobky) – potlačení vzniku zapáchajících produktů radiolýzy
- jednotlivé země povolují ozařování různých druhů potravin
- nepovoluje se ozařovat čerstvé maso, ovoce a zeleninu

### Účinky IZ na rostliny:

- **pozorovaný účinek závisí na objemu chromozomů** (objem jádra připadajícím na jeden chromozom), na rychlosti růstu rostliny, na frakcionaci dávky záření
- **jednorázové ozáření**: odolnější pomaleji rostoucí rostliny
- **chronické ozařování**: odolnější rychleji rostoucí rostliny
- **jehličnaté dřeviny**: zpomalení růstu při 0,01 – 0,1 Gy/den
- **ostatní rostliny**: zpomalení růstu při 1-100 Gy/den
- **radiační šlechtění**: ozáření semen 100 – 1000 Gy, vznik mutací, část užitečných (odrůda obilí s většími výnosy a odolnější vůči chorobám apod.)

### LD50 v Gy pro RTG a $\gamma$ záření:

Druh	Dávka
Ovce	1.5-2
Člověk	2.5-3.5
Pes	2.5-3
Myši různých linií	5.5-12
Ptáci, hadi	8-20
Členovci	10-1000
Kvasinky	300-500
Rostliny	10-1500
<i>Micrococcus radiodurens</i>	$10^5$ Gy/den

### Ostatní účinky IZ:

- odstraňování statické elektřiny (ionizace vzduchu  $\alpha$  zářením  $^{210}\text{Po}$  či  $^{241}\text{Am}$ )
- **ionizační hlásiče kouře** ( $^{241}\text{Am}$  o malé aktivitě + ionizační detektor záření, kouř mění ionizační proud)
- **radionuklidové baterie** využívají tepelných účinků IZ (absorpce  $\alpha$  a  $\beta$  záření v látce), tepelnou energii převádí na elektrickou ( $^{238}\text{PuO}_2$  v kardiostimulátorech (g) či družicích (kg), poločas 86 let, použití asi 20 let, nevzniká  $\gamma$ :  $^{238}\text{Pu} \rightarrow ^{234}\text{U} + \alpha$ )
- **radionuklidové světelné zdroje** jsou založeny na emisi viditelného světla při absorpci IZ v některých látkách (kdysi  $^{226}\text{Ra}$  a  $\text{ZnS}$ ), dnes  $\beta$  zářiče  $^3\text{H}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{147}\text{Pm}$ , signalizační lampy, číselníky hodinek a měřicí přístroje apod.
- **barvení skel**: ozařování dávkami 1 kGy, vytvářejí se poruchy absorbující viditelné světlo, trvanlivost desítky let (měření dávek), zkracuje se za vyšších teplot

## 4. Radioaktivita a IZ v životním prostředí

Ozáření člověka z přírodních a umělých zdrojů ionizujícího záření:

zdroj záření	$\dot{H}$ ( $\mu\text{Sv rok}^{-1}$ )	podíl (%)
kosmické záření	380	12,5
kosmogenní radionuklidy	12	0,4
přírodní radionuklidy — zevní ozáření <sup>a</sup>	460	15,0
přírodní radionuklidy — vnitřní ozáření <sup>a</sup>	230	7,5
radon a produkty jeho přeměny	1300	43,1
těžební průmysl <sup>b</sup>	24	0,75
jaderná energetika <sup>c</sup>	8	0,2
výroba radionuklidů	0,8	0,02
radioaktivní spotřební produkty	0,4	0,01
lékařské aplikace	660	20,6

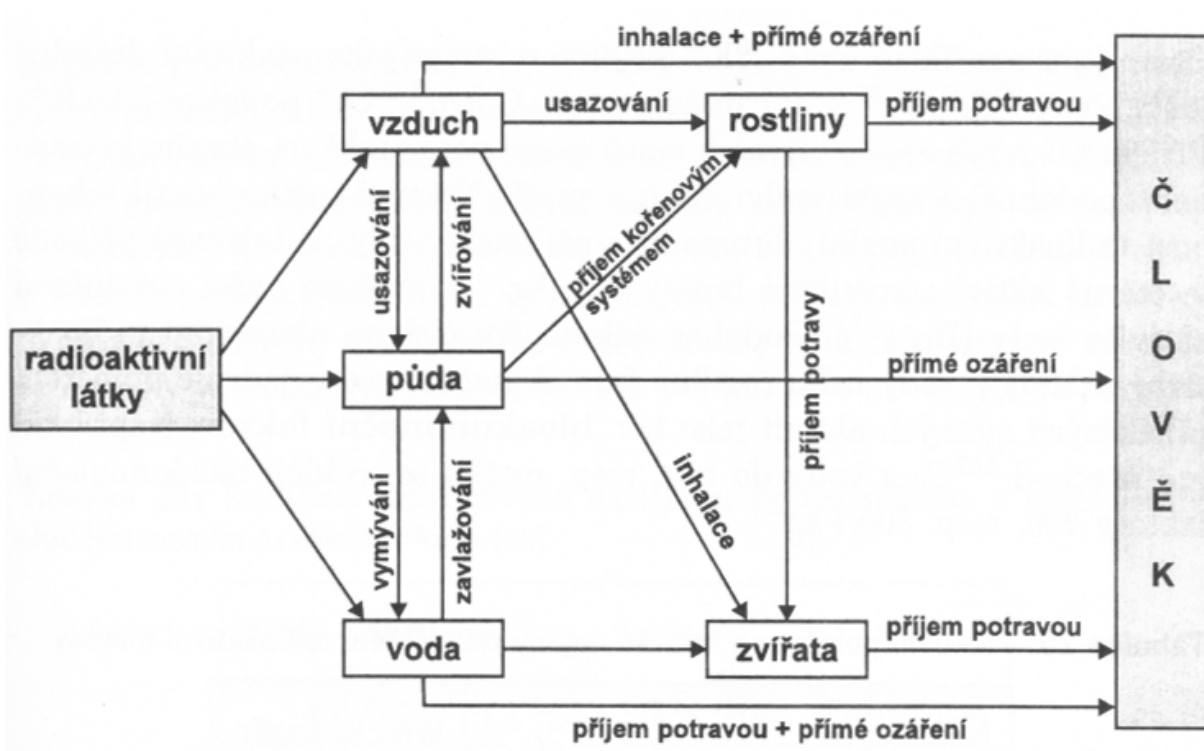
a – Mimo radon a produkty jeho přeměny.

b – Radon a produkty jeho přeměny z těžby a spalování fosilních paliv a z těžby a zpracování fosfátových hnojiv.

c – Nezahrnuje ozáření v případech havárií jaderných zařízení.

<http://www.suro.cz/cz/rms/svz/ter/index.html>

Působení radioaktivních nuklidů v životním prostředí na člověka:



Efektivní poločasy a kritické orgány pro některé radioaktivní nuklidy:

Nuklid	T	$T_{ef}^a$	kritický orgán
$^3\text{H}$	12,35 roků	10–20 dní	celé tělo
$^{14}\text{C}$	5736 roků	35 dní	tuková tkáň
$^{90}\text{Sr}$	28,1 roků	15 roků	kost
$^{131}\text{I}$	8,05 dní	7,5 dní	štítná žláza
$^{137}\text{Cs}$	30 roků	70 dní	celé tělo
$^{210}\text{Po}$	138,4 dní	58 dní	celé tělo
$^{226}\text{Ra}$	1620 roků	45 roků	kost
$^{239}\text{Pu}$	24400 roků	110 roků	kost, plíce

$$T_{ef} = T_{1/2} * T_b / (T_{1/2} + T_b)$$

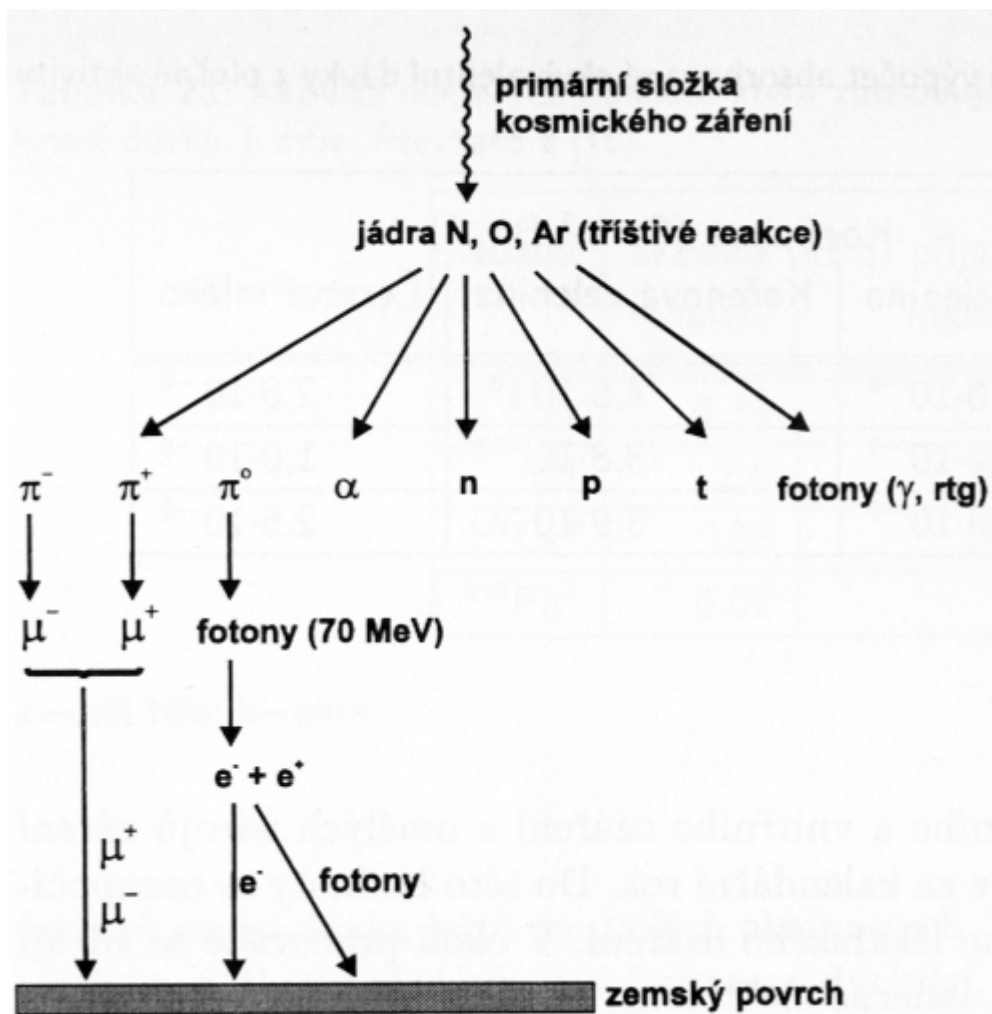
## 4.1. Kosmické záření a kosmogenní RN

**Primární složka kosmického záření** – 85% protonů,  $\alpha$  12,5 %, elektrony, těžší jádra od Li po Fe (rozlišuje se galaktická a solární), **intenzita** –  $10\ 000\ \text{na}\ \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , energie –  $10^9 - 10^{20}\ \text{eV}$

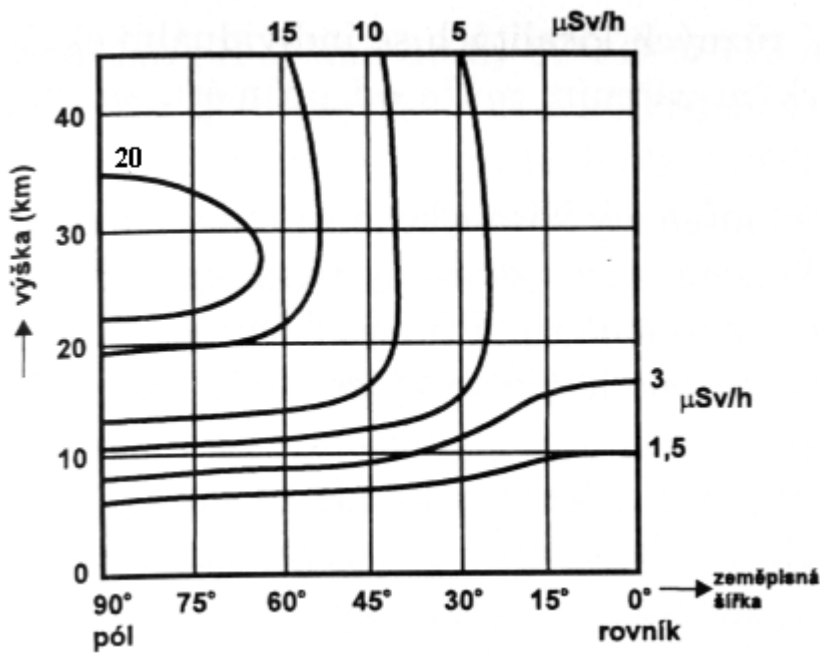
**Sekundární složka kosmického záření** – protony, neutrony, piony, lehká jádra ( $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ ) a fotony (až 10 MeV), **jaderné reakce** – vznik kosmogenních radionuklidů

**Na povrch dopadá:**

- **tvrdá složka KZ**, miony až 600MeV, protony do 400 MeV, piony – proniká až 1km pod zem
- **měkká složka KZ**, elektrony, pozitrony, fotony, protony s nízkou energií, lze odstínit cca 10 cm olova



**Intenzita KZ závisí na zeměpisné šířce a nadmořské výšce:**



Průměrná roční ekvivalentní dávka z KZ: 380  $\mu\text{Sv}$

Průměrná ekvivalentní dávka za 600 letových hodin (n a  $\gamma$  sekundární složky):

10 km – 4mSv  
 12km – 7,5 mSv

Posádky orbitálních stanic (primární KZ, záření z Van Allenových pásů): 100 – 500  $\mu\text{Sv}/\text{den}$  (6,5  $\mu\text{Sv}/\text{den}$  z přír. zdrojů)

Při meziplanetárních letech je riziko menší (nejsou tam Van Allenovy pásy), nebezpečná těžká jádra  $w_R = 10-15$  (Apollo 11 podivné záblesky – těžké částice v očích)

### Kosmogenní RN:

- vznikají jadernými reakcemi v atmosféře
- nejvýznamnější je  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$
- v atmosféře se  $^{14}\text{C}$  rychle oxiduje na  $^{14}\text{CO}_2$ , dostává se do rostlin a živočichů ( $A = 2,5 \text{ kBq}$  v lidském těle)
- **tritium** vzniká např. reakcí  $^{14}\text{N}(n, t)^{12}\text{C}$ , oxiduje se na  $\text{H}^3\text{HO}$ , aktivita u pólu 5 Bq/l, na rovníku 0,06Bq/l, zde asi 0,6 Bq/l



## 4.2. Přírodní RN s dlouhým poločasem rozpadu

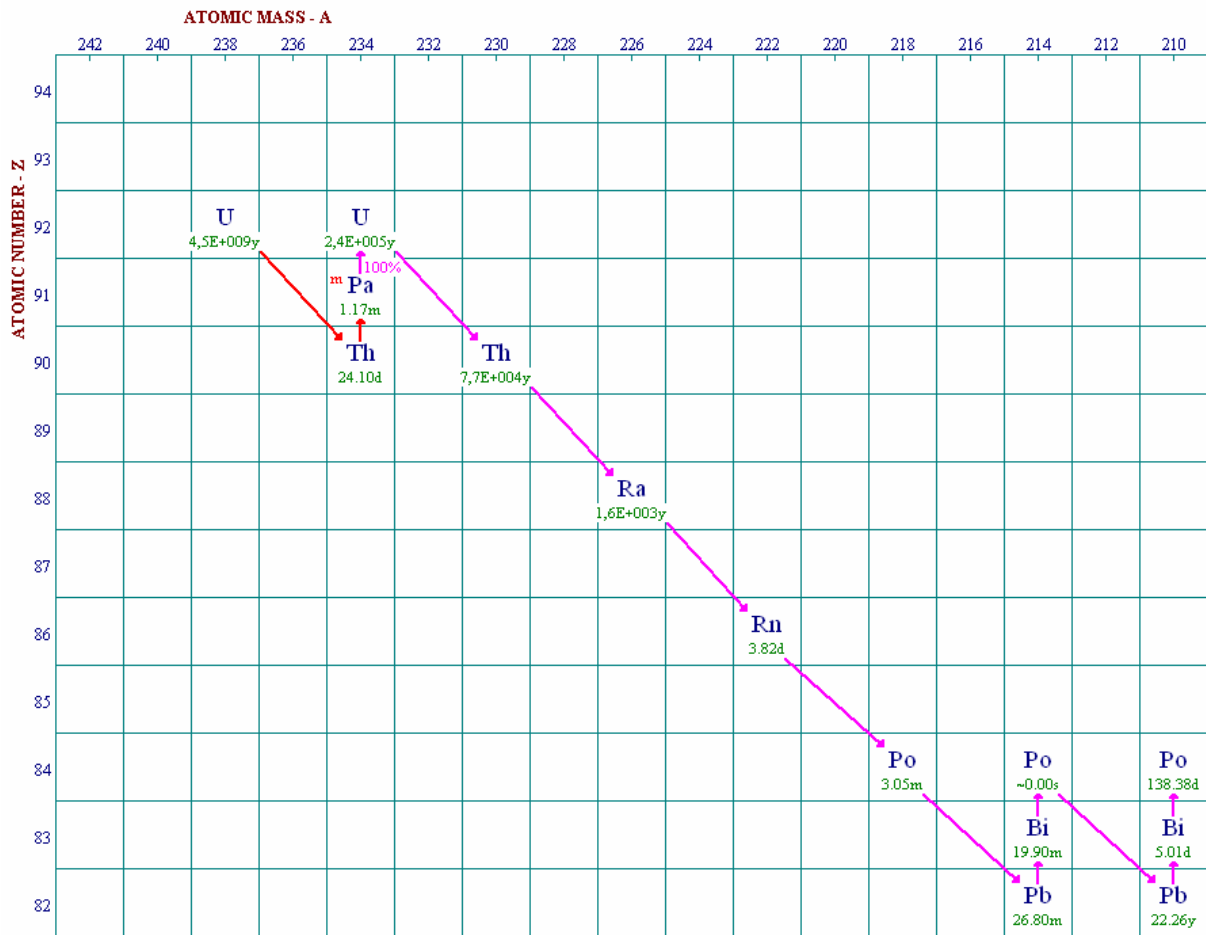
- zemská kůra obsahuje asi 30 RN
- významné jsou pouze  $^{232}\text{Th}$  a  $^{238}\text{U}$  a jejich produkty přeměny a  $^{40}\text{K}$

$^{40}\text{K}$ :

- zastoupení v K 0,012 %
- průměrná měrná aktivita v horninách 313 Bq/kg
- aktivita v zemské kůře je větší než všech přírodních radionuklidů dohromady
- podílí se na zevním i vnitřním ozáření lidského organismu (součást těla 22 – 76 kBq/70kg, horniny, stavební materiály)
- aktivita v potravinách 20 – 240 Bq/kg

U a Th:

- 1kg zemské kůry průměrně obsahuje 6mg U (70 Bq/kg) a 12 mg Th (50 Bq/kg)
- Th je v horninách pevně vázán ale U se oxiduje na  $\text{UO}_2^{2+}$  a luhuje se vodou ( $5 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-5}$  g/l)
- důležitý je i  $^{226}\text{Ra}$  (je v rovnováze s  $^{238}\text{U}$ ),  $\alpha$  rozpadem vzniká  $^{222}\text{Rn}$  (riziko rakoviny plic),  $^{226}\text{Ra}$  se po požití ukládá v kostech (homolog Ca) a ozařuje krvetvornou tkáň, Ra se z hornin luhuje vodou ( $3 \cdot 10^{-14} - 2 \cdot 10^{-13}$  g/l)
- Jáchymovské prameny obsahují velmi mnoho Ra (0,7 – 18,5 MBq/m<sup>3</sup>), používají se k léčebným účelům



Z 230  $\mu\text{Sv}$  (průměrná dávka z vnitřního ozáření) připadá 200  $\mu\text{Sv}$  na  $^{40}\text{K}$ , 5  $\mu\text{Sv}$  na  $^{226}\text{Ra}$ , zbytek připadá na další produkty přeměny  $^{238}\text{U}$  a  $^{232}\text{Th}$ .

### Spalování uhlí:

- průměrná měrná aktivita uhlí 70 Bq/kg
- v popílku cca 550 Bq/kg
- pro kritickou skupinu obyvatel 10-50  $\mu\text{Sv}/\text{rok}$  (1-5 % dávky z přírodních RN)

## 4.3. Radon

Vzniká přeměnou  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  a  $^{238}\text{U}$ , významný je jen  $^{222}\text{Rn}$  ( $T_{1/2} = 3,8$  dne) vznikající přeměnou  $^{238}\text{U}$

Zdrojem radonu je **především půda** (40 Bq/kg). Ten pak dále **difunduje z půdy ven** (do domů, dolů, do atmosféry)

Do domů vniká **nasáváním půdního vzduchu**, především v zimě.

Stavební materiály produkují **minimum radonu**. **Vyjimka:** domy Start postavené z tvárnic ze škváry z uhelných elektráren, uhlí obsahovalo uran (1 - 4 kBq/kg).

**Radonový program** – měření radonu v 95 000 domech v letech 1991 – 1996

A (Bq/m <sup>3</sup> )	200-300	300-600	600-1000	>1000
počet domů	6020	6152	1592	580

V současnosti měření pozemků před stavbou a **stanovení radonového indexu** (dříve radonové riziko). Závisí nejen na množství uranu v podloží ale i na propustnosti půd.

**Průměrná hodnota v domech:** 40 Bq/m<sup>3</sup>.

**Ve volném prostoru:** 10 Bq/m<sup>3</sup>.

Zdrojem radonu může být i voda ve které je rozpustný, uvolňuje se až při vyšších teplotách (**koupelny!**).

**Méně významné zdroje:**

- spalování fosilních paliv
- zemní plyn (většinou ale vymře dřív než se dostane ke spotřebiteli)

zdroj záření	$\dot{H}$ ( $\mu\text{Sv rok}^{-1}$ )	podíl (%)
kosmické záření	380	12,5
kosmogenní radionuklidy	12	0,4
přírodní radionuklidy — zevní ozáření <sup>a</sup>	460	15,0
přírodní radionuklidy — vnitřní ozáření <sup>a</sup>	230	7,5
radon a produkty jeho přeměny	1300	43,1
těžební průmysl <sup>b</sup>	24	0,75
jaderná energetika <sup>c</sup>	8	0,2
výroba radionuklidů	0,8	0,02
radioaktivní spotřební produkty	0,4	0,01
lékařské aplikace	660	20,6

a – Mimo radon a produkty jeho přeměny.

b – Radon a produkty jeho přeměny z těžby a spalování fosilních paliv a z těžby a zpracování fosfátových hnojiv.

c – Nezahrnuje ozáření v případech havárií jaderných zařízení.

### Riziko radonu:

- **riziko nepředstavuje radon** (vydechuje se) **ale produkty přeměny** ( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  a  $^{214}\text{Po}$ ), jsou to  $\alpha$  a  $\beta$  zářiče.
- **adsorbují se na aerosoly** a ty se pak usazují v plicích a **ozařují plicní epitel** (kouření snižuje riziko plynoucí z ozáření plic radonem), ovšem u kuřáků působí vliv kouření a radonu **synergicky**
- u nižších dávek **neodpovídá riziko bezprahovému modelu** ale uplatňuje se hormeze ovšem v menší míře než u vnějšího ozáření
- rakovina plic způsobená kouřením 80 % případů; radonem 10-15 % případů

Směrné hodnoty pro provedení zásahů (dříve přispíval stát, v současnosti na vlastní náklady):

Ekvivalentní objemová aktivita radonu ( $\text{Bq/m}^3$ )	Přiměřený typ zásahu
200 – 300	jednoduchá opatření: zvýšení přirozeného větrání, případně zavedení nucené ventilace

300 – 600	složitější opatření: středně nákladné stavební úpravy, nucená ventilace
600 – 2000	zásadní stavební úpravy objektu
> 2000	vyloučení pobytu osob

## 4.4. Jaderné elektrárny

Množství RN vypouštěných z JE se uvádí jako **celková aktivita, měrná aktivita (Bq/MW, Bq/m<sup>3</sup>)**

**Radioaktivita převážně v chladicí vodě (tlakovodní reaktory):**

- **jod, cesium, vzácné plyny** – **únik mikrotrhlinami** z palivových tyčí
- **tritium** – **vzniká ve vodě** reakcemi:  $^2\text{H}(n, \gamma)^3\text{H}$  a  $^{10}\text{B}(n, 2\alpha)^3\text{H}$  ( $10^{10}$  –  $10^{11}$  Bq/m<sup>3</sup>)
- **<sup>51</sup>Cr, <sup>54</sup>Mn, <sup>59</sup>Fe, <sup>58</sup>Co a <sup>60</sup>Co** – nejvýznamnější RN pocházející **z konstrukčních materiálů** reaktoru a vznikající reakcemi (n,  $\gamma$ ) tzv. korozivní produkty

Chladicí voda se filtruje a vede přes iontoměniče. Uvolňují se **izotopy vzácných plynů** a přes vymírací nádrž se postupně dostávají do atmosféry ( $^{85}\text{Kr}$  (10%)  $T_{1/2} = 11$  let a  $^{133}\text{Xe}$  (90%)  $T_{1/2} = 5$  dnů).

Odpadní voda kromě **stop korozivních produktů** obsahuje i **tritium**.

Stejně vypustě produkují i závody na přepracovávání jaderného paliva.

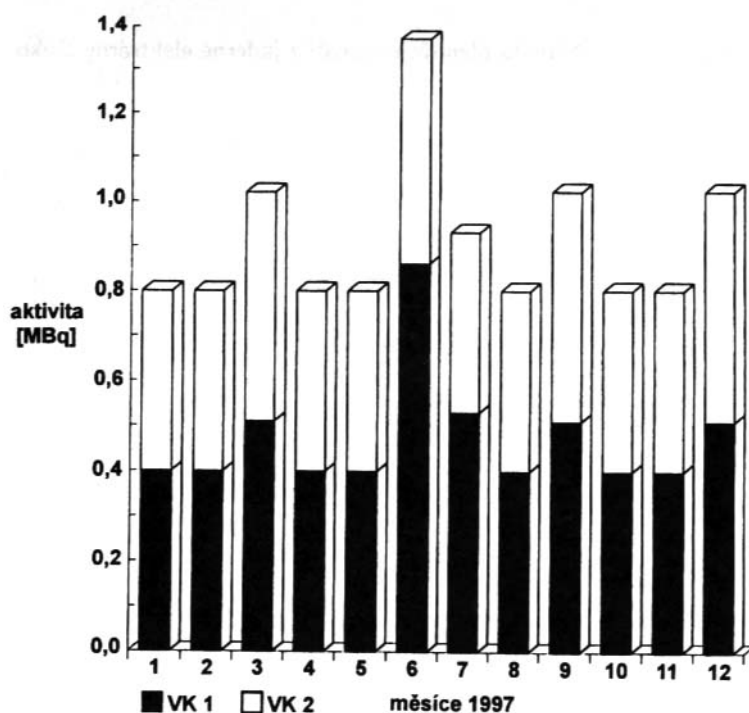
**Současný průměrný obsah  $^{85}\text{Kr}$  je 1 – 2 Bq/m<sup>3</sup>.**

**Mezinárodní doporučení:**  $E_{\text{kolektivní}} < 40\text{mSv/MW}$  (pro kritickou skupinu obyvatel, ve skutečnosti cca 1%)

**Uhelná elektrárna:** na 1GW za rok 3 milióny tun uhlí vyprodukuje 7 miliónů tun CO<sub>2</sub>, 120 000 tun SO<sub>2</sub>, 20 000 tun oxidů dusíku a 750 000 tun popílku

**Jaderná elektrárna:** na 1GW za rok 30 tun paliva (snadná doprava), cca 1% množství CO<sub>2</sub> z uhelných elektráren.

Obsah izotopů jodu (indikátor netěsnosti pokrytí palivových elementů) v plynných výpustech ve větracích komínkách z elektrárny Dukovany:



Limitní a skutečná aktivita plynných výpustí z jaderné elektrárny Dukovany v roce 1997:

Složka	Limit (Bq)	Výpust za rok 1997 (Bq)	Procento ročního limitu
rad. vzácné plyny	$4,1 \cdot 10^{15}$	$4,17 \cdot 10^{11}$	0,010
aerosoly	$1,8 \cdot 10^{11}$	$2,44 \cdot 10^8$	0,136
<sup>131</sup> I	$4,4 \cdot 10^{11}$	$1,11 \cdot 10^7$	0,0025
<sup>89</sup> Sr + <sup>90</sup> Sr	$5,7 \cdot 10^8$	$1,36 \cdot 10^5$	0,024
<sup>3</sup> H	není stanoven	$3,08 \cdot 10^{11}$	–

## 4.5. Havárie jaderných reaktorů

- v minulosti řada nehod a havárií
- **pouze u třech (4)** uniklo větší množství radioaktivních látek mimo elektrárnu

MAAE přijala v roce 1991 mezinárodní stupnici pro hodnocení jaderných nehod. Stupnice má sloužit především k rychlému informování veřejnosti o závažnosti nehod:

### 0. Událost pod stupnicí (Below scale)

Situace, při kterých nebyly překročeny provozní limity.

### 1. Odchyłka (Anomaly)

Funkční, nebo provozní odchyłky. Nepředstavují riziko, ale odhalují nedostatky bezpečnostních opatření.

### 2. Porucha (Incident)

Technické poruchy, nebo odchyłky, které neovlivňují přímo chod a bezpečnost elektrárny, ale mohou vést k následnému přehodnocení bezpečnostních opatření.

Mihama-2, jaderná elektrárna, Japonsko, 1991

Pickering A-B, jaderná elektrárna, Kanada, 2003

### 3. Vážná porucha (Serious accident)

Únik radioaktivních látek mimo elektrárnu nad povolené limity. Individuální dávka pro obyvatele v blízkosti elektrárny je řádově 0,1 mSv. Personál je nadměrně ozářen (přes 50 mSv).

Vandellos, jaderná elektrárna, Španělsko, 1989

Davis Besse-1, jaderná elektrárna, USA, 2002

Paks, jaderná elektrárna, Maďarsko, 2002

#### **4. Havárie s účinky v jaderném záření (Accident mainly in instalation)**

Malý únik radioaktivity mimo elektrárnu, individuální dávka pro obyvatele je řádově 1 mSv. Aktivní zóna reaktoru je částečně poškozena. Ozáření pracovníků elektrárny může vést k okamžitým zdravotním následkům (řádově Sv, **nemoc z ozáření**).

Jaslovské Bohunice, ČSSR, 1972

Windscale Pile, Přepřacovatelský závod, Velká Británie, 1973

Saint Laurent, jaderná elektrárna, Francie, 1980

Tokaimura, závod na výrobu paliva, Japonsko, 1999

#### **5. Havárie s účinky na okolí (Accident with off-site risks)**

Únik radioaktivity (100 až 1000 TBq  $^{131}\text{I}$ , nebo jiných, podobně biologicky účinných izotopů ) mimo elektrárnu. Velká část zóny reaktoru poškozena tavením. Evakuace blízkého obyvatelstva.

Windscale, Velká Británie, 1957

Three Miles Island, USA, 1979

#### **6. Závažná havárie (Serious accident)**

Únik radioaktivity (1000 až 10 000 TBq jódu, nebo jiných, biologicky podobně účinných látek) mimo elektrárnu. K omezení účinků je třeba provést místní havarijný plán.

Kyštym, Přepřacovatelský závod, SSSR, 1957

#### **7. Velká havárie (Major accident)**

Únik radioaktivních látek mimo elektrárnu je větší než 10 000 TBq různých izotopů. Možnost okamžitých zdravotních následků. Dlouhodobé následky pro životní prostředí.

Černobyl, SSSR, 1986



### Jaslovské Bohunice (4), ČSSR, 1972:

- do reaktoru byl zaveden palivový článek, ucpaný silikagelem (zabraňoval zvlhnutí článku)
- ucpaným palivovým článkem nemohl proudit chladicí plyn a téměř nechlazené těleso se začalo tavit
- vysoká teplota způsobila poškození nádoby s tlakovou vodou, ta se dostala do primárního okruhu a způsobila rychlou erozi povlaků palivových článků a tím i uvolnění radioaktivních látek
- radioaktivita zamořila i sekundární okruh, všechny radioaktivní látky však zůstaly uvnitř elektrárny, nikdo z obsluhy nebyl zraněn, ani ohrožen.

### Windscale (5), Velká Británie, 1957



- grafitový reaktor, chlazený vzduchem
- sloužil výhradně k produkci plutonia pro vojenské účely
- ráno 8. října došlo vinou nepozornosti obsluhy k přehřátí několika palivových článků
- následovalo vznícení povlaků z hořčíkové slitiny
- požár se podařilo uhasit za čtyři dny
- uvolněné radioaktivní látky ( $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{131\text{m}}\text{Xe}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{Te}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ ) se přes komín rozptýlily nad Anglii, Wales a severní Evropu
- uniklo 13 500 TBq radioaktivních látek, největší dávkový příkon  $40\mu\text{Gy/h}$  1,5 km od reaktoru po směru větru
- rychlý zásah zdravotnických organizací zabránil rozšíření  $^{131}\text{I}$  ( $T_{1/2} = 8$  dnů)
- na území o rozloze  $520\text{ km}^2$  v okolí Windscale byl vyhlášen zákaz spotřeby mléka, který byl odvolán po 44 dnech
- dávky obyvatelstvu v nejbližším okolí se pohybovaly mezi 5 a 60 mSv

- provoz elektrárny už nebyl obnoven
- ve své době havárie nevzbudila prakticky žádnou pozornost, přestože její dopad na obyvatele byl oproti nehodě v Three Mile Island mnohem větší

<http://www.suro.cz/cz/rms/svz/ter/index.html>

Three Miles Island (5), USA, 1979



- blok 2 jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem o tepelném výkonu 2772 MW byl necelý rok starý
- havárii zahájil výpadek jednoho ze dvou parogenerátorů elektrárny
- po havarijním odstavení reaktoru začal pomalý únik chladicí vody z chladicího okruhu
- příčinou byl zaseknutý ventil, únik nebyl včas odhalen
- ztráta veškerého chladiva vedla k tavení aktivní zóny
- plné odstranění následků havárie trvalo týden, neboť se v horní části reaktoru vytvořila obtížně odstranitelná bublina, obsahující vodík, která bránila bezpečnému ochlazování aktivní zóny

- únik radioaktivity mimo elektrárnu byl velice nízký a nevyžadoval žádná zvláštní opatření ( $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{131}\text{I}$ ), v blízkém okolí elektrárny byla maximální dávka 1mGy
- přesto však byla nehoda zařazena do třídy 5, vzhledem k silnému poškození elektrárny a vysokému zamoření aktivní zóny, reaktor byl natrvalo vyřazen z provozu
- účinek na veřejnost byl ale mnohem větší než v případě Windscale, americká média totiž o nehodě obšírně informovala (senzacectivost reportérů, panika, dopravní kolaps)
- celosvětové přehodnocení koncepce jaderné bezpečnosti, revize stavu mnoha reaktorů

### Kyštym (6), Přepracovatelský závod, SSSR, 1957

- znečištění tisíců čtverečních kilometrů na Středním Uralu v Rusku, způsobila patrně stovky lidských ztrát
- veškeré zprávy o ní však byly zamlčeny
- Čeljabinsk-40, závodu na produkci plutonia, asi 16 kilometrů východně od průmyslového města Kyštym na jižním břehu jezera Kyzyl-taš
- vědci byli pod silným nátlakem, aby vyrobili dostatek plutonia, které by umožňovalo provedení zkoušky první sovětské bomby před Stalinovými sedmdesátinami v prosinci 1949, (bomba byla nakonec přivedena k explozi v srpnu toho roku)
- k nehodě téměř jistě došlo koncem prosince 1957 či začátkem ledna 1958, protože 9. ledna 1958 radio Moskva věnovalo značnou část vysílacího času informacím o nemoci z ozáření a detailnímu seznamu preventivních opatření
- 100 km od Sverdlovska výstražná tabule u cesty varovala řidiče, aby následujících třicet kilometrů nezastavovali a jeli maximální rychlostí se zavřenými okénky (Profesor Leo Tumerman 1960)
- města z asi sto kilometrů dlouhého sektoru tvaru písmene L zmizela = masový přesun obyvatelstva
- nejpravděpodobnější vysvětlení je běžná chemická exploze způsobená nahromaděním plynů okolo horkého nukleárního odpadu

## Tehdejší stav:

1. Voda, používaná od roku 1950 k chlazení reaktorů, silně kontaminovaná průtokem děravými palivovými tyčemi, byla vypouštěna do řeky Teča a tak se kontaminace rozšiřovala;
  2. Vegetaci v okolí 20 km okolo zařízení zničily kyselé deště. K extrakci  $^{239}\text{Pu}$  z ozářených palivových článků byla používána kyselina dusičná a vzniklé oxidy dusíku, jod a xenon byly odváděny ze zásobníků do atmosféry, kde z nich vznikaly nebezpečné a patrně radioaktivní kyselé deště;
  3. Sověti ukládali svůj nukleární odpad spíš v otevřených nádržích než v uzavřených cisternách. Po odpaření tekutiny se tak dno nádrže mohlo pokrýt vysoce radioaktivním prachem, který mohl být rozptýlen silnějším větrem.
- v šedesátých letech bylo do oblasti dopraveno "komando smrti" tvořené vězni, kteří na kontaminovanou plochu rozprostřeli na tři stopy vysokou vrstvu písku a hlíny
  - tato zpustošená krajina, ohrazená a přejmenovaná na "[Čeljabinský celosvazový radiologický manévrovací a cvičný prostor](#)", byla pak používána jako cvičný prostor pro tankové oddíly
  - v prosinci 1988 došlo také k prvnímu oficiálnímu sovětskému doznání o nehodě v Kyštymu

Černobyl (7), SSSR, 1986



- ukrajinská Černobylská elektrárna s vodou chlazenými reaktory typu RBMK (grafitový moderátor) o tepelném výkonu 3200 MW (elektrický 950 MW)
- 25. dubna, 1986 bylo zahájeno plánované odstavení 4. bloku elektrárny
- před odstavením měl být proveden experiment který měl ověřit, zda bude elektrický generátor (poháněný turbínou) schopen dodávat proud po rychlém uzavření přívodu páry a při svém setrvačném doběhu ještě zhruba 40 vteřin napájet čerpadla havarijního chlazení

## Průběh experimentu

**13:05:00**

Výkon reaktoru byl snížen na polovinu a byl odstaven turbogenerátor. Krátce poté **byl odpojen systém havarijního chlazení**, aby nezačal fungovat během experimentu.

**23:10:00**

Při snižování výkonu došlo k neobvyklé události. Chybou operátora výkon prudce klesl na 30 MW. Reaktor je v tomto režimu značně nestabilní a **operátoři měli v tomto okamžiku experiment ukončit a reaktor definitivně odstavit**. Rozhodli se však v experimentu pokračovat.

**01:23:04**

Reaktor byl stále nestabilní, operátoři se pokusili stabilizovat jej a zvýšit výkon, což se jim nepodařilo ani za použití regulačních tyčí.

**01:23:20**

**Byl zablokován havarijní signál, který by po uzavření přívodu páry na turbínu automaticky odstavil reaktor**. Pak operátoři odstavili přívod páry.

**01:23:40**

Operátoři dali signál k havarijnímu odstavení reaktoru, ale účinek byl příliš pomalý na to, co se v reaktoru dělo

**01:23:44**

V části reaktoru došlo k „akutnímu neutronovému energetickému šoku“. Během čtyř sekund stoupl výkon čtvrtého bloku stonásobně. Část paliva rozložila a vypařila chladicí vodu. Výbuch (1) páry roztrhl tisícitunový příklop čtvrtého bloku. Žhnoucí trosky padaly na okolní budovy a založily přes třicet požárů. Další voda reagovala s dočervena rozpáleným grafitovým jádrem reaktoru o hmotnosti 1 700 tun, při čemž vznikala plynný vodík, který během sekundy detonoval (2) a vymrštil radioaktivní odpad a radionuklidy do výše přes 1,5 kilometru do ovzduší.

**02:20:00**

Požár byl lokalizován a za 3 hodiny později uhašen za cenu životů hasičů a pracovníků elektrárny, kteří utrpěli většinou těžké popáleniny z ozáření (31).

- po deseti dnech velkého úsilí se podařilo dostat jádro reaktoru zpět pod kontrolu
- helikoptéry shodily na otevřené jádro reaktoru více než 5 000 tun olova, bóru a jiných materiálů
- z reaktoru uniklo od okamžiku výbuchu do 6. května 1986 asi 4% radioaktivních látek přítomných v reaktoru ( $2 \cdot 10^{19}$  Bq)
- nejvíce kontaminováno bylo nejbližší okolí elektrárny
- $30\,000\text{ km}^2 > 185\text{ kBq/m}^2$
- 200 000 osob se podílelo na likvidaci havárie, průměrná dávka 100 mSv
- z 237 osob se u 134 projevila akutní nemoc z ozáření, 28 zemřelo do 3 měsíců (26 radiační poškození kůže a poškození dýchacího ústrojí (tzv. horké částice, lokálně až 100 Gy), 2 zahynuly při explozi, 1 na infarkt
- během dalších měsíců zemřelo ještě 14 osob ale souvislost z havárií nebyla prokázána
- osoby které přežily vysoké ozáření trpí řadou potíží včetně psychických poruch



- ke konci roku 1995 800 případů rakoviny štítné žlázy navíc (3 smrtelné), očekáváno objevování případů ještě několik desetiletí
- podle konzervativního modelu odhadnuto že mezi 7,2 mil. obyvatel bude 470 smrtelných případů leukémie navíc (norm. 25 000), 6600 výskytů rakoviny za 85 let (norm. 870 000)
- u 200 000 osob 200 případů leukémie navíc (norm. 800), zatím nepozorováno
- obyvatelé však nebyli včas a správně informováni o rozsahu a následcích výbuchu, evakuace začala až několik hodin po výbuchu
- nejbližší okolí elektrárny je uzavřenou zónou dodnes
- dnes již radioaktivita v okolí elektrárny poklesla a tak se někteří důchodci vracejí do svých domů
- protože foukal severní vítr (naštěstí pro Kyjev), radioaktivní mrak se vydal do Běloruska
- zasáhl celých 75 % jeho území
- dodnes je zamořeno 25% běloruského území
- v ČR průměrná dávka za 1. rok cca 0,3 mSv
- následující rok vzrostla koncentrace  $^{137}\text{Cs}$  v potravinách, pak rychle klesala
- u hub 1985 1kBq  $^{137}\text{Cs}$  na 1kg sušiny, 1986 40 kBq na 1 kg sušiny

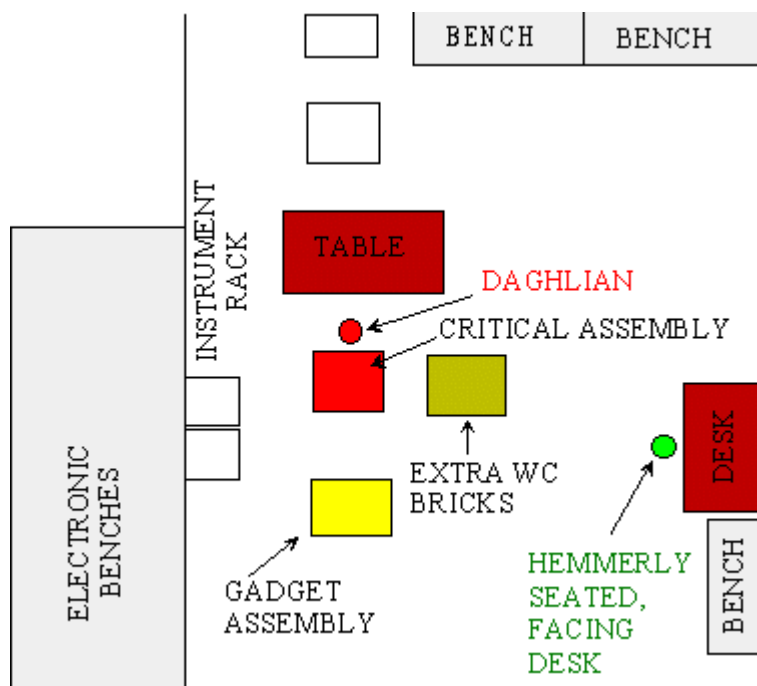
## 4.6. Nehody při práci s radioaktivními látkami

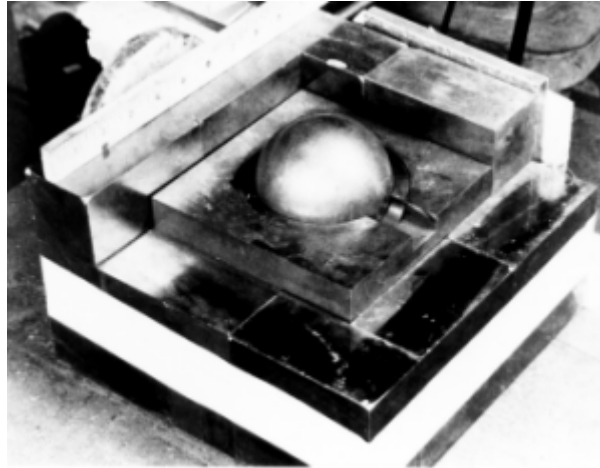
### Nehoda 1.



- **Harry K. Daghlian Jr.** (1921-1945) student fyziky na Purdue University
- do Los Alamos přišel na podzim v r. 1943 a pomáhal zde s instalací cyklotronu, na jaře 1944 se stal členem skupiny provozující malý výzkumný varný reaktor v Los Alamos, později přešel do "Critical Assembly Group" (chování Pu a  $^{235}\text{U}$  v blízkosti kritického stavu a testovala konstrukci plutoniové nálože pro pokusný výbuch Trinity v Alamogordo)
- Daghlian prováděl experimenty s koulí plutonia (6.2 kg) obklopenou cihličkami karbidu wolframu: účelem experimentu bylo zjistit praktické uspořádání vnitřku plutoniové bomby
- ráno 21. srpna 1945 sestavil kolem plutoniové koule krychli z karbidových cihliček o hraně 38 cm: toto uspořádání vede ke kritickému stavu ještě před dokončením šesté vrstvy cihliček
- odpoledne jiné uspořádání, tentokrát měla krychle hranu 31 cm a uspořádání se blížilo kritickému stavu při dokončení páté vrstvy cihliček
- stále nevyřešen úspěšný kritický design obklopující plutoniovou kouli

- večer (21:30) se Daghlian vrátil do laboratoře, přestože **provádění nebezpečných pokusů po pracovní době a o samotě bylo proti předpisům**
- v laboratoři: **vojín Robert J. Hemmerly** (četl noviny)
- strážnému Daghlian připadal trochu nervózní, úkolem strážného ale bylo hlídat plutonium
- Daghlian vyndal plutoniovou kouli z trezoru a začal kolem ni stavět krychli z cihliček karbidu
- **řídil se hlasitým tikáním přístrojů** (Geiger-Müller)
- **dokončil asi polovinu páté vrstvy a téměř přiložil další cihličku doprostřed vrstvy**, přesahující nyní vrchol plutoniové koule, když ho **prudký vzrůst tikání** Geigeru upozornil, že se systém blíží kritickému stavu
- **rychle ucuknul**, a těžká karbidová cihlička mu vypadla z ruky a trefila se **přímo doprostřed nedokončené krychle s plutoniem uvnitř**
- Daghlian reflexivně smetl cihlu na zem
- **ucítil v pravé ruce mírné svrbění, když ji vnořil do modré záře obklopující plutoniovou kouli**
- modré světlo zhaslo, bylo 21:55 večer





- Hemmerly seděl u stolu **vzdáleného asi 3,7 m** od místa nehody, otočený zády, náhlý přechod tikání Geigeru na soustavné vrčení, modrý záblesk a bouchnutí těžké cihličky smetené na podlahu upoutaly jeho pozornost - otočil se a viděl, jak Daghlian stojí nad experimentem, celý bezradný
- Daghlian pak **demontoval havarovaný experiment do stabilnějšího uspořádání** a informoval Hemmerlyho o vzniklé situaci
- Daghlian byl odvezen do nemocnice
- Hemmerly informoval svého nadřízeného o havárii a **byl také hospitalizován**
- plutoniová koule přežila havárii bez poškození, žádný radioaktivní materiál se nerozptýlil po laboratoři, laboratoř měla tlusté stěny (1,5 m zdiva), které ochránily ostatní lidi v budově před radiací
- Hemmerly byl v nemocnici na pozorování jen **dva dny**: krátkodobě zvýšený počet leukocytů
- strávil několik týdnů v rekonvalescenci, neprojevil se u něj žádné příznaky nemoci z ozáření, **po 2 měsících se vrátil do služby**
- efektivní dávka činila **cca 0,32 Sv**, během následujících 4 let se mu narodily **dvě zdravé děti**, kromě nadváhy a mírné hypertenze byl celkem zdravý, **zemřel ve věku 62 let na leukémii**
- efektivní dávka u Daghliana činila přibližně **5,9 Sv**, distribuce byla velmi nerovnoměrná - **nejvíce ozářeny byly jeho ruce a horní polovina těla**, levá ruka byla ozářena ekvivalentní dávkou přibližně **50 - 150 Sv**, pravá ruka - která shodila karbidovou cihličku a přerušila tak řetězovou reakci - obdržela ekvivalentní dávku **200 - 400 Sv**
- pravá ruka **začala okamžitě otékat** a byla necitlivá na dotyk

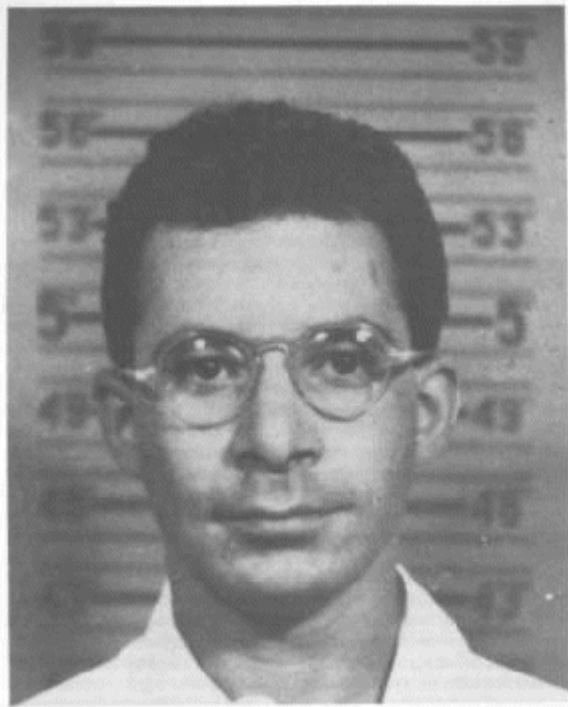
- prudká a neustávající nevolnost, záchvaty dávení a zvracení se dostavily 90 minut po nehodě
- nevolnost přetrvávala více než dva dny, během nichž zvracení vystřídal prudké neustávající škytání
- po dvou dnech se vrátila chuť k jídlu, avšak brzy se dostavily další vážné příznaky
- 2. dne po nehodě se na prsteníku pravé ruky objevil malý puchýřek a nehtová lůžka nabrala šedomodrý odstín - příznak špatného krevního oběhu
- během následujícího dne se na pravé ruce vyvinulo množství puchýřů na dlani, hřbetu ruky a mezi prsty, puchýře se rychle zvětšovaly a bolestivě se nadouvaly tekutinou



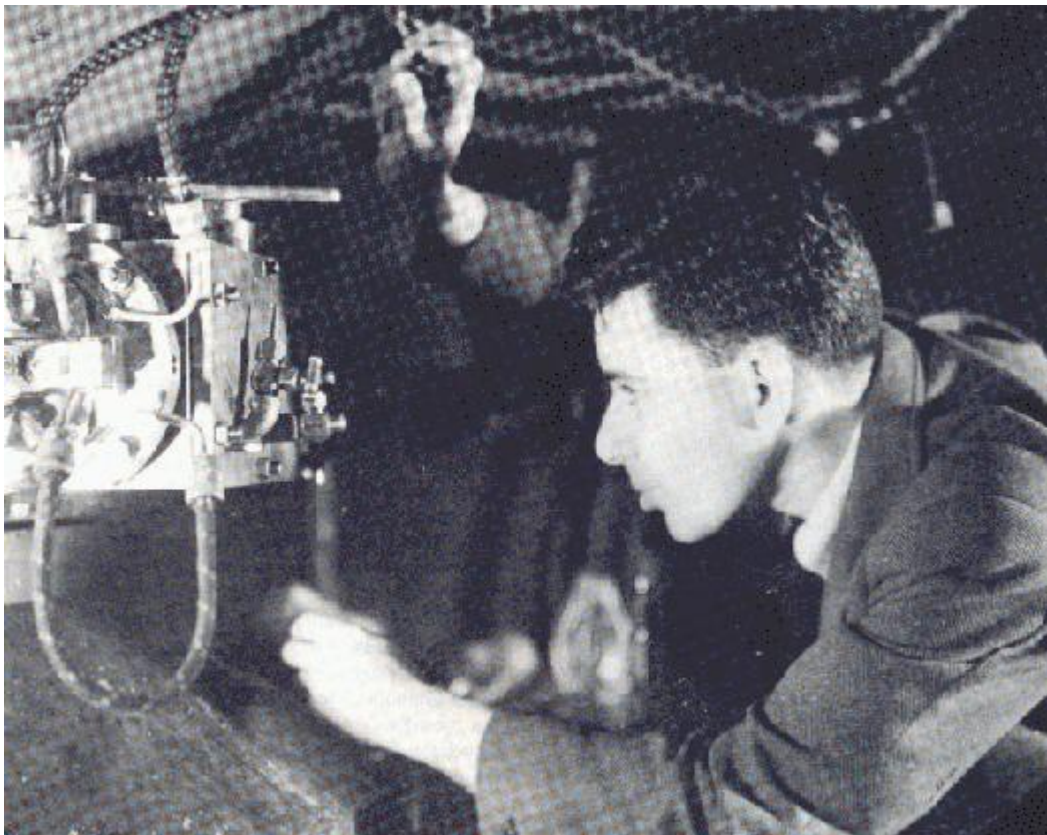
- kůže na levé ruce a na břicho také začala postupně rudnout
- pro úlevu bolesti lékaři otevřeli puchýře, odstranili odumřelou tkáň na pravé ruce a provedli paravertebrální blokádu na pravé straně
- odstraňování nekrotické tkáně a otvírání puchýřů se opakovalo každé 3-4 dny, rány byly zakryty gázou napuštěnou vazelínou
- pacient dostával morfin, kodein a také velké dávky penicilinu
- postupně se jeho celá pravá ruka pokryla puchýři a její barva se změnila na zlověstně modro-purpurovou už během čtvrtého dne
- léky proti bolesti neměly dostatečný účinek, postižené ruce byly proto chlazeny ledem
- rozsah ozáření začal být zjevný s pokračujícím zrudnutím kůže, které postupně pokrylo obě paže, krk a přední část trupu, následovalo loupání vrstev pokožky (desquamace) na postižených místech

- **10. den po nehodě** Daghlian pocítil nevolnost a bolesti břicha při jídle, břicho bylo oteklé a citlivé na pohmat
- **prudké břišní křeče se zhoršovaly, avšak po několika dnech náhle pominuly**, od dvanáctého dne až do smrti však pacient trpěl konstantním průjmem
- **15. den** obdržel pacient krevní transfúzi, pacient byl bledý, jeho kůže byla studená a zvlhlá, ačkoli jeho teplota (v konečníku) byla 40,6 °C, tep byl velmi rychlý a povrchní (250 tepu/min, tachykardie), krevní tlak poklesnul na 70/50
- podávání léků ani další léčba nepomáhaly, epizoda trvala do následujícího dne, kdy se stav upravil sám od sebe
- **další transfúze a intravenózní tekutiny již nebyly podávány**, z obavy, že by mohly navodit další srdeční epizodu, navíc kvůli desquamaci (odlupování kůže) byly cévy na ruce a krku nepoužitelné pro intravenózní aplikace
- **ošetřování pacienta se zaměřovalo pouze na tišení příznaků** (morfin, kodein, penicilin, chinidinu, podávání vitamínu (B1) a dietní strava), chlazení popálenin ledem, odstraňování puchýřů a odumřelé tkáně a zavádění trubic do střev
- několik dní před smrtí pacient začal blouznit a poslední den upadl do bezvědomí
- jeho vzezření se drasticky změnilo díky **postupujícímu hubnutí**, které začalo šestého dne a pokračovalo stále rychlejším tempem, **úplně ztratil kůži na břicho a spodní polovinu hrudníku, chlupy na ramenou, vousy ve tváři a vlasy na spáncích**
- Daghlian zemřel 15 září 16:30, **25 dnů po nehodě**
- úmrtní list uvádí jako příčinu smrti "**rozsáhle popáleniny horních končetin a trupu**"

## **Nehoda 2.**



Een kopie van een originele pasfoto van Louis Slotin, die genomen werd toen hij in 1944 op Los Alamos gestationeerd werd. (Bron: Los Alamos National Laboratory)



- **Louis P. Slotin** (1910-1946) vystudoval chemii a fyziku na University of Manitoba v Kanadě
- pokračoval ve studiu biochemie na King's College v Londýně
- od r. 1937 byl asistentem na University v Chicagu a věnoval se práci s cyklotronem, která po příchodu Fermiho do Chicaga nakonec vedla k Slotinově účasti na **Projektu Manhattan**
- během války Slotin pracoval v Oak Ridge, kde se zabýval experimenty s prvním výkonným jaderným reaktorem, postaveným pro výrobu plutonia
- koncem roku 1944 přijel do Los Alamos a pracoval zde se štěpným materiálem
- byl schopný, nebojácný při práci s radiací, v Chicagu před válkou Slotin se svými kolegy **postavili cyklotron vlastníma rukama**, včetně letování obvodu osciloskopu ze základních součástek, a dokonce **pokládání kabelu a betonování základu v suterénu budovy**
- na svém cyklotronu Slotin mimo jiné také vyráběl malá množství  $^{14}\text{C}$  a jeho spolupracovníci krmili tímto značeným uhlíkem pokusná zvířata - **holuby** (pro radiobiologické pokusy se používala pouze játra pokusných zvířat), Slotin byl jediný z celé skupiny, **který ty radioaktivní holuby jedl** (z finančních důvodů?), občas to v práci nabízel ostatním :-)

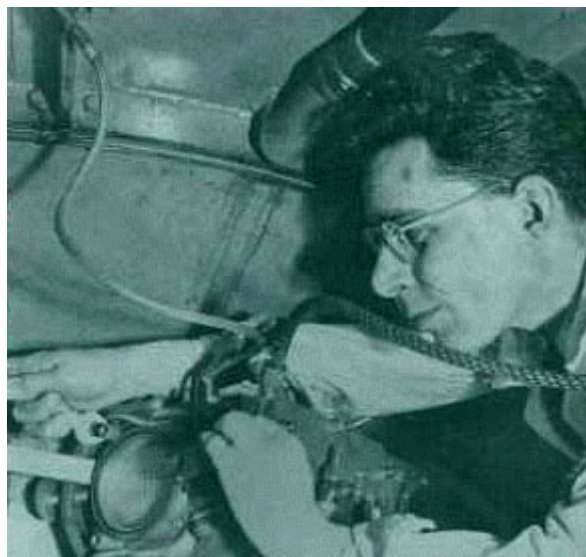
### Slotin rád šokoval své kolegy:

Při jednom experimentu na grafitovém reaktoru v Oak Ridge bylo zapotřebí provést změnu uspořádání experimentu. Jenže celé experimentální zařízení bylo ponořeno v nádrži s vodou pod reaktorem; voda sloužila jako moderátor zpomalující neutrony. Přerušování experimentu mělo trvat nejméně celý víkend - naplánována byla odstávka reaktoru a vypumpování nádrže. V pondělí se Slotinův šéf ke své hrůze dozvěděl, že Slotin už ten experiment předělal – s reaktorem za chodu. Slotin se ponořil do nádrže a experiment bleskově upravil pod hladinou - spočítal si totiž, že největší dávka z reaktoru pochází z gama záření a dostatečně tlustá vrstva vody gama záření odstíní. A **když se trochu sníží výkon reaktoru**, výsledný neutronový tok v ozařovací nádrži pod reaktorem nebude až tak silný, takže tam bude možné pod hladinou **”chvilku vydržet”**.



- V Los Alamos byl Slotin jeden z nejdůležitějších lidí v "Critical Assembly Group", (experimentálním zkoumáním uspořádání štěpného materiálu uvnitř jaderné bomby).
- experimenty se štěpným materiálem se často úmyslně přivedly až na samotný okraj rozjezdu lavinovité řetězové reakce ("lechtání draka pod ocasem")
- budovu Omega stála daleko od Los Alamos, uvnitř kaňonu a oddělená byla od města několika kaňony a náhorními plošinami
- spouštění kusu  $^{235}\text{U}$  (v podobě hydridu uranu) skrz větší, subkritický kus z téhož materiálu (krátkodobé překročení kritického množství, měření radiace od štěpných produktů)
- odraz neutronů od materiálu obklopujících plutonium v těsně podkritickém stavu
- Slotin: bravurní experimentátor, učil ostatní techniku zacházení se štěpným materiálem, vše se dělá ručně (nedostatek času), provedl stovky kritických experimentů, sestavil vnitřek 1. atomové bomby (Trinity, Alamogordo, Nové Mexiko), podílel se na stavbě bomby svržené na Nagasaki

Slotin montuje první atomovou bombu Trinity:



- první vážná nehoda v budově Omega 21. srpna 1945 způsobila **smrt studenta Harry K. Daghliana**, Slotin svému příteli dělal společnost v nemocnici, po Daghlianově smrti Enrico Fermi varoval Slotina: **”Pokud si budeš takhle zahrávat, do roka bude po tobě!”**
- 21.5.1946 - po konferenci, vzal Luis Slotin ostatní šéfy z Los Alamos na exkurzi laboratoří, návštěvníci si prohlédli laboratoře a zase odešli, jen **Alan Graves** – nástupce, který měl po Slotinovi převzít jeho skupinu - řekl, že **ještě nikdy neviděl kritický experiment**
- **S. A. Kline**, student fyziky, se chtěl také podívat, ve stejné době ve speciální tlustostěnné, stíněné laboratoři v budově Omega, pracovalo **dalších pět fyziků**
- všichni se zájmem pozorovali, jak se Slotin chystá předvést pokus (systém se přivede až na samotnou hranici rozjezdu lavinovité štěpné reakce, ale nenechá se překročit kritickou mez)

### Experimentální uspořádání:

Malá **koule z plutonia** o hmotnosti 6,2 kg (velikost tenisového míčku) byla z půlky zapuštěna v podstavci z berylia. Za současného ozařování **slabým zdrojem neutronů** se na odkrytou horní půlku plutoniového míčku zvolna spouští poklop z berylia - ve tvaru duté polokoule. Množství plutonia a tloušťka berylia byly zvoleny tak, aby **došlo k překročení kritického stavu v okamžiku, kdyby poklop téměř dosednul na plutoniovou kouli** zapuštěnou v beryliovém podstavci – tomu se zabránilo ponecháním volné štěrbiny mezi beryliovým podstavcem a poklopem. Velikost štěrbiny určovala vzdálenost systému od kritického stavu. Na experiment byla použita **stejná koule plutonia, s níž měl nehodu Daghlian**.

Fotografie znázorňující rekonstrukci experimentu po havárii:



- **bezpečnější provedení:** poklop upevněn ve stojanu a podstavec s plutoniem se opatrně přibližuje zvedákem
- **nebezpečné (jednodušší) provedení:** podstavec stojí na stole, Slotin drží poklop v ruce – palec zasunutý v otvoru v horní části poklopu - opírá beryliový poklop hranou o podstavec a opatrně ze strany přiklápí
- o nebezpečnosti takového postupu se vědělo – proto byly vyvinuty **jednoduché stavěcí zářezky** s nastavitelnou tloušťkou, které se dávaly mezi podstavec a poklop
- Slotin však **zářezky odstranil** a ve štěrbině mezi poklopem a podstavcem držel zastrčený **konec šroubováku**

### Průběh experimentu:

Alvin Graves se zaujetím pozoroval, jak Slotin opatrným pootáčením ploché hrany vsunutého šroubováku zvolna zmenšuje štěrbinu mezi nyní přiklopeným poklopem a podstavcem - každá

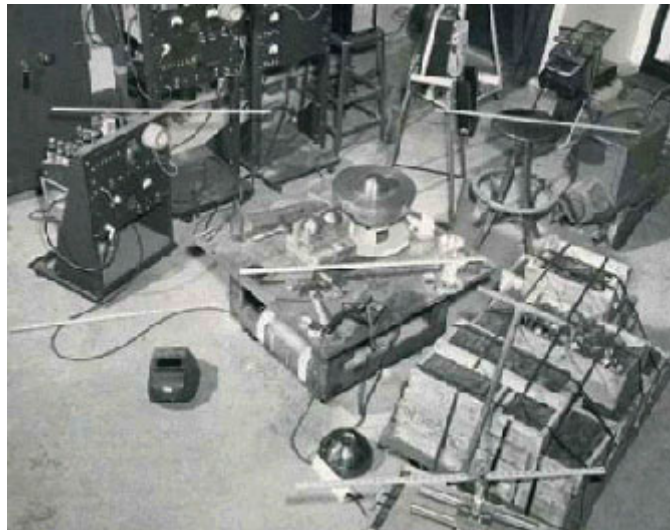
změna pozice se projevila odpovídajícím zesílením intenzity tikání Geigeru. Alvin Graves se ještě naklonil blíž, aby na to lépe viděl. Slotin tento experiment v minulosti již provedl mnohokrát a byl si s sebou jistý.

Pomalým otáčením šroubováku měnil velikost štěrbin, poslouchal tikání Geigeru a zároveň podával výklad sedmi lidem ve svém okolí – mnohem větší publikum, než obvykle míval při experimentech.

**Beryliový poklop se mu náhle smeknul z hrany šroubováku a zaklapnul se** - a plutonium bylo kompletně obklopené reflektorem. Vzplálo **oslnivě modrobílé světlo** a **vlna horkého vzduchu se převalila místností**. Slotin, který stál nejbližší, ve stejnou chvíli ucítil pachut' na jazyku a bolest v ruce držící beryliový poklop.

Slotin měl pravou ruku na experimentu a zareagoval okamžitě – vrhnul se směrem k podstavci, odtrhnul horní část reflektoru a odhodil ho na podlahu; světlo zhaslo. Bylo 15:20. Slotin jen tiše poznamenal: "That does it" - "A je to."

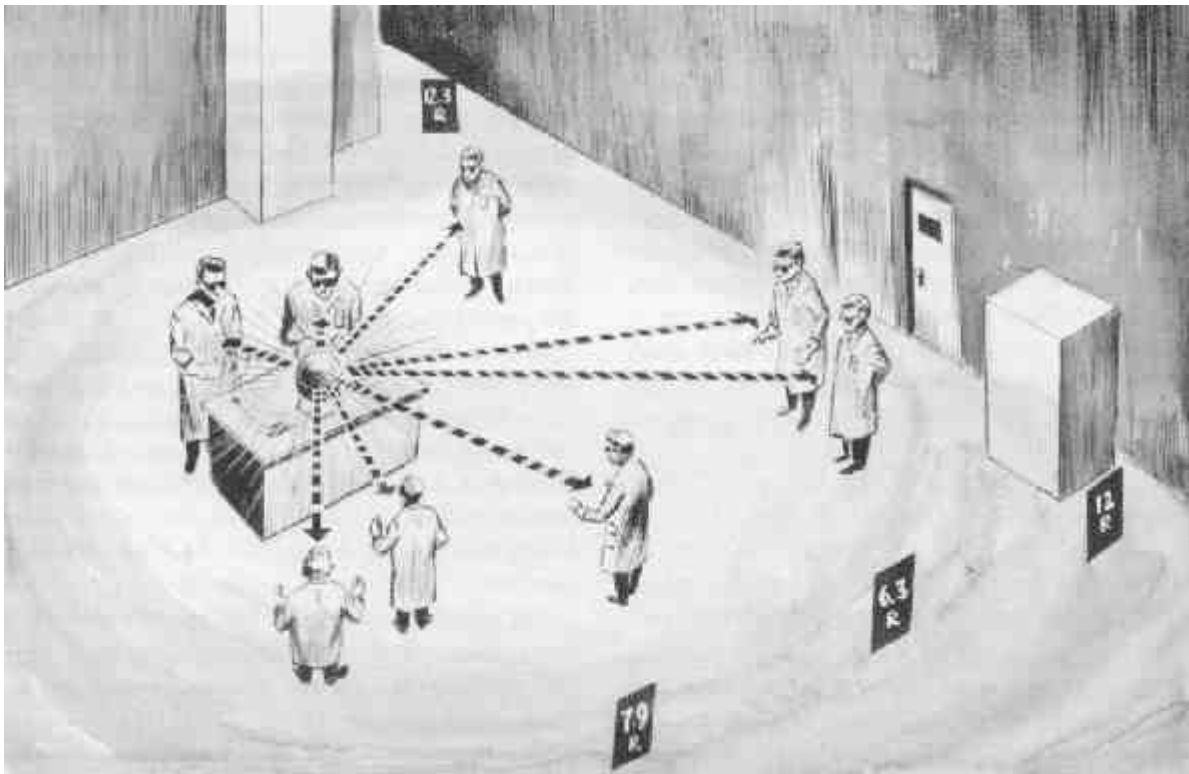
Fotografie po nehodě:



Po nehodě:

- červený graf zapisovaný ručičkou přístroje detekujícího neutrony **byl na maximu – mimo okraj papíru** - a Geigery **dál** zlověstně **tikaly**: prudký tok neutronů indukoval radioaktivitu v kovových předmětech v místnosti

- účastníci nehody uháněli k východu z budovy, přivolali strážného aby jim odemknul bránu, zazněl evakuační signál a účastníci experimentu i ostatní lidé z budovy se rozprchli ven na silnici a za hliněný val, někteří vyběhli na nedaleký kopec s vrcholem asi 305 m nad úrovní terénu
- Slotin neutíkal - nejprve se venku potýkal se záchvatem zvracení, pak vyšel z budovy aby oznámil kolegům, že se můžou vrátit - radiace klesla na přijatelnou hodnotu
- v laboratoři provedli rekonstrukci a nakreslili plánec, **aby bylo možné určit míru ozáření**, plutoniová koule přežila nehodu bez poškození



- Luis Slotin obdržel efektivní dávku cca **21 Sv**, Alvin Graves, který stál poblíž, obdržel efektivní dávku **3,6 Sv**, expozice ostatních lidí byla **2,5; 1,6; 1,1; 0,47 a 0,37 Sv** (analýza izotopového složení kovových předmětů jako jsou hodinky, mince, klíče ozářených osob, **Slotinovi se např. na jazyku udělal bolák – v okolí zlatého zubu**)
- Slotin utrpěl typické příznaky **těžké nemoci z ozáření** – výrazné zhoršení krevního obrazu, prudce bolestivý otok rukou spojený s rozsáhlými puchýři následovala sněť, kůže na ostatních částech těla

byla zrudlá a citlivá, po přechodném zlepšení se dostavil průjem, těžké poškození ledvin, paralýza žaludku a střev a nakonec poruchy všech ostatních životních funkcí, sedmý den po nehodě se dostavilo blouznění a potom koma

- Luis Slotin **zemřel v bezvědomí 9. den** po nehodě podobným způsobem jako Daghlian, ale rychleji; byl ozářen dávkou **čtyřikrát vyšší**

Alvin Graves a Samuel Allan Kline přežili dávky radiace, které se v té době považovaly za smrtelné - ale dlouho se potýkali s těžkými následky ozáření. **Graves zemřel v r.1965 na infarkt. Kline žil až do r. 2001.** Tři z pěti dalších osob však **zemřely během let na leukémii.**

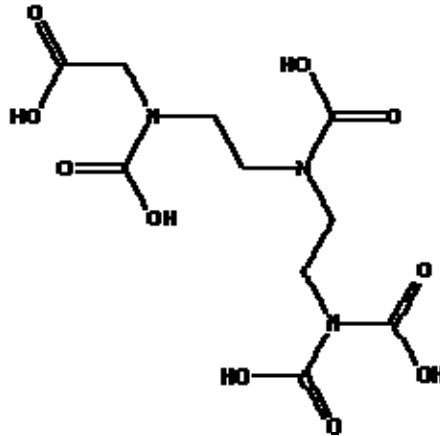
- byly zastaveny všechny kritické experimenty (do doby než byly instalovány dálkově ovládané manipulátory)

### **Nehoda 3.**

po půlnoci 30.9.1976, Hanford, továrna na výrobu  $^{241}\text{Am}$

- **nejtěžší případ ozáření člověka pracujícího v jaderném zařízení v americké historii**
- 65letý Harolda McCluskeyho sledoval chemické pochody při tvorbě izotopů
- po několika hodinách této kritické směny zaslechl McCluskey syčení a spatřil hustý dým uvnitř digestoře, v příštím okamžiku **došlo k silnému výbuchu a gumová maska na jeho obličeji byla silou výbuchu stržena**, stovky úlomků radioaktivního kovu, olověného skla a gummy se mu zasekly do kůže, **kyselina dusičná ho dočasně oslepila, což mu ztěžovalo únik**, během této doby vdechl největší kdy zaznamenanou dávku americia
- maximální přípustné ozáření (vnitřní) americiem za celou dobu lidského života **je 2 kBq**, McCluskey vdechl asi **11 MBq**
- 9 dalších zaměstnanců, kteří byli ozáření též, se po pár dnech vrátilo do práce
- McCluskey byl převezen do Richmondu na Nouzové odmořovací oddělení k dlouhodobé léčbě

- byl osprchován (voda ze sprchy obsahovala 100 MBq  $^{241}\text{Am}$ )
- McCluskey strávil následujících 5 měsíců v železobetonové izolační komoře v péči sester, které nosily respirátory a ochranné oděvy
- po většinu této doby **neviděl ani neslyšel**
- dostával **pokusné injekce DTPA** (diethylene triamine pentaacetic acid)



- léčba byla úspěšná a 14.2.1977 se McCluskey vrátil domů, protože se  **podařilo jeho vnitřní kontaminaci snížit o 80 %**
- McCluskey se rozhodl vládu zažalovat o 975 000 dolarů odškodného, nakonec přijal 275 000 a plnou doživotní lékařskou péči
- zbytek svého života strávil v ústraní v městečku Prosser
- **zemřel 17. srpna 1987** (smrt nesouvisela z ozáření)

#### **Nehoda 4.**

1983, Mexiko

- tři pracovníci sběrný starého železa v mexickém městě Juárez poblíž hranic Texasu **ukradli z nemocničního skladu vyřazený přístroj (3 tuny) na ozařování nádorů**
- částí přístroje byla rotující hlavice s olověným krytem a **6010 kovovými kuličkami (1 mm  $\varnothing$ )  $^{60}\text{Co}$  2,6 MBq/kuličku**
- po vhození přístroje na sběrný nákladňák se  **olověný kryt roztrhl a kuličky se rozkutálely**

- některé se přilepily na gumy okolo projíždějících aut, jiné na podrážky kolemjdoucích, hráli si s nimi děti ze skladiště starého kovu, přístroj byl zaslán dvěma mexickým slévárnám oceli, ty přístroj roztavily a **použily při výrobě 500 tun armovacích želez a 17 000 noh ke stolům**, které byly v první řadě určeny pro vývoz
- nehoda byla odhalena pouze **prapodivnou náhodou**: 16. ledna zabočil kamion s radioaktivními armovacími železy blízko Národní laboratoře v Los Alamos (důležité středisko amerického výzkumu jaderných zbraní) na špatnou odbočku, přitom přešel kolem **speciálního čidla na měření IZ** (mělo předejít tomu, aby byl vyvezen ze závodu radioaktivní materiál)
- do konce února se podařilo najít **94% všech noh od stolů**; s armovacími železy byl oproti tomu větší problém, protože již byly částečně zabudovány do staveb
- železa musela být vytržena ze základů soukromých domů, státní věznice, zdravotnického centra; základy pak musely být znovu obnoveny
- v Mexiku našly přes 60 radioaktivních kuliček rozsypaných po silnici
- nejméně 200 lidí obdrželo významné dávky ozáření mezi **0,01 až 0,5 Sv**, jeden mexičan dostal do rukou dávku **100 Sv**, tři muži, kteří ukradli přístroj, a dva muži ze šrotového skladiště obdrželi efektivní dávku cca **5 Sv**. **Nejméně 3 000** mexických pracovníků ze dvou sléváren obdrželo dávky mezi **3 a 4,5 Sv**
- většina obětí se po krátkodobém ozáření poměrně **rychle zotavila**
- Mexická vláda uzavřela šrotové skladiště a uložila zamořený šrot - asi **2 000 až 6 000 tun radioaktivního kovu a kamion** - do země na speciálně upraveném místě mezi Juárezem a Chihuahuou

## **Nehoda 5.**

1985, Goiania, Brazílie

- při likvidaci radiobiologické kliniky bylo v budově ponecháno ozařovací zařízení se zdrojem  $^{137}\text{Cs}$  (93 g  $^{137}\text{CsCl}$ ,  $5 \cdot 10^{13}$  Bq, ve vzdálenosti 1 m byl dávkový příkon 4,5 Gy/hod)



- 2 muži odvezli zařízení domů, kde se pokusili rozebrat, porušili ocelové pouzdro a chlorid cesný se částečně rozptýlil
- zařízení pak odvezli do sběrný, kde si majitel všiml že zařízení modře světélkuje a tak pozval příbuzné a známe aby se na tento úkaz podívali, někteří si odnesli kousky radioaktivního materiálu domů
- po několika dnech se u některých lidí objevili problémy se zažívacím traktem a byla zjištěna souvislost s ozářením
- 4 osoby zemřeli během několika týdnů po ozáření dávkou 4,5 – 6 Gy a u 249 osob se v různé míře projevíly následky ozáření
- bylo nutné vyšetřit na ozáření a kontaminaci 119 000 osob, mnoho osob evakuovat ze zamořených domů a provést nákladné a rozsáhlé monitorovací, demoliční, odmořovací a likvidační práce

## 4.7. Pokusné jaderné a termionukleární výbuchy

### Jaderné testy USA:

- 1. výbuch atomové bomby: 16.7.1945 v 5:29:45 "Trinity"
- čtvrt hodiny po výbuchu se atomový mrak rozdělil na tři části
- největší část se pohybovala rychlostí asi 16 km/h ve výšce 14 – 17 km směrem na severovýchod
- v prvních dvou hodinách po explozi kleslo na zem jen malé množství spadu, pak bylo spadem poměrně těžce zamořeno území o rozloze asi 480 km<sup>2</sup>
- stopy radioaktivního zamoření byly zjištěny v Santa Fé, Las Vegas a v Trinidadu v Coloradu, tedy ve vzdálenosti až 420 km od místa výbuchu
- několik let po výbuchu tajně vnikaly do této oblasti obyvatelé, aby nasbírali "Trinitit" – skelnou hmotu, která vznikla roztavením písku, zahřátého při výbuchu na několik milionů stupňů Celsia, hmotu pak prodávali turistům

- cca 50 km od epicentra se nachází vápencová vysočina, na které se pásł dobytek z většiny sousedících rančů, tato vysočina měla ze všech území vně zakázané oblasti největší radioaktivní zamoření
- na tomto dobytku byl také nejdříve pozorován účinek radioaktivního spadu
- asi měsíc po explozi začínaly herefordské krávy ztrácet srst, brzy jim sice zase narostla nová, ale nebyla již červenohnědá, nýbrž bílá
- krávy se proslavily jako „atomová telata“ a byly vystavovány v El Pasu a Alamogordu
- když vyšlo na základě vyšetřování najevo, že změna zbarvení srsti byla způsobena radioaktivním spadem po výbuchu Trinity, bylo 75 krav nejvíc postižených ozářením odkoupeno za finanční prostředky Projektu Manhattan a odvezeno do Los Alamos a Oak Ridge
- ve výzkumných zařízeních byla provedena další vyšetření, ještě v roce 1947 nebyly zjištěny žádné genetické změny nebo průkazné mutace, mnoho krav přežilo a zplodilo zdravé potomstvo, další byly zabity a snědeny

### Operace Crossroads:

- dva atomové výbuchy o síle asi 23 kilotun, které byly provedeny v létě 1946 v laguně ostrova Bikini
- test Able - atomová bomba byla svržena z letadla a explodovala ve výšce 160 metrů
- test Baker - byla atomová bomba zavěšena pod středně velkou výsadkovou lodí na asi 30 m dlouhém kabelu a odpálena pomocí dálkového ovládní
- při každé explozi sloužilo jako cíl asi 80 námořních lodí bez posádky
- operace Crossroads se zúčastnilo asi 42 000 lidí, 240 lodí (cílové a zásobovací) a 160 letadel, na cílových lodích bylo umístěno asi 200 koz, 200 prasat a 5 000 krys, aby na nich mohly být zkoumány účinky jaderných výbuchů

### Test Able

Uskutečnil se 1.7.1946. Podle zprávy v příručce o radiologické ochraně, která byla publikována po operaci Crossroads, došlo při explozi k oslňujícímu světelnému záblesku, který trval několik milióntin sekundy, a potom se z bublajících žhavých plynů utvořila rychle rostoucí ohnivá koule. Z centra výbuchu se šířila rázová vlna, která byla viditelná na vodě jako ohromné mihotavé světlo šířící se všemi směry. Když ohnivá koule zmizela, vytvořil se velký bílý mrak ve tvaru hříbu, který obsahoval kouř, štěpné produkty, nerozštěpené částice a prach, a zvedl se do výšky 9 – 12 km

### Test Baker

Po vyhodnocení škod způsobených výbuchem při pokusu Able byl uskutečněn 25.7.1946 test Baker. Na rozdíl od prvního testu vystříkl při výbuchu Bakeru z laguny do vzduchu velký gejzír vody. Příručka o radiologické obraně publikovaná po Operaci Crossroads popisuje, jak se po počátečním záblesku vytvořil obrovský vodní sloup o průměru téměř 800 metrů a vysoký 1,5 – 1,8 km. Na jeho vrcholu se rozpínal hříbovitý mrak plynů a vodní tříště. Když se sloup vody zřítíl zpět do laguny, rozšířila se všemi směry mohutná, asi 300 metrů vysoká vlna z napěněné vody a bahna, která zalila cílové lodě. Úřední zpráva odhadla, že by členové mužstva zdržující se na palubách lodí vzdálených do 640 metrů od epicentra obdrželi smrtelnou dávku záření za 30 až 60 sekund, ve vzdálenosti do 1 550 metrů za 7 minut a ve vzdálenosti do 2 300 metrů za 3 hodiny.

- 1951 – 1958 bylo v USA na výzkumném území v Nevadě, 120 km na severozápad od Las Vegas, provedeno **přes sto nadzemních atomových testů**
- radioaktivní spad, vzniklý při testech, kontaminoval rozsáhlé okolí výzkumného území

### Test Bravo (1. termonukleární bomba)

„Dovoluji si poznamenat, že všechny testy jsou prováděny cíleně a testování se nikdy nevymklo kontrole.“

*Admirál Lewis Strauss, 30.3.1954*

- 1.3.1954 v 6.45 byla odpálena první vodíková bomba s krycím jménem "Bravo" na ostrově Bikini v malé výšce nad zemí. Původně se očekávalo, že bude mít účinek jen 6 Mt, ale ve skutečnosti měla účinek 15 Mt, Výbuch vytvořil kráter hluboký 74 metrů a 1 800 metrů v průměru a ohnivá koule rozrušila ohromné množství korálového atolu; vysála jej a roznesla nad široké území, kde se snesl ve formě radioaktivního spadu.

### Britské jaderné testy:

- koncem čtyřicátých let se rozhodli britští politici, stimulováni rostoucími obavami z atomové politiky Sovětského svazu a monopolu atomových zbraní USA, vyvinout ve Velké Británii vlastní atomovou zbraň
- jaderné testy byly provedeny v Austrálii
- v letech 1952 - 1958 bylo celkem provedeno 21 britských jaderných testů, 12 z nich na pevnině nebo v její blízkosti a devět na pokusném území na Vánočním ostrově

### Francouzské jaderné testy:

- 1. pokus se uskutečnil 13. února 1960 pod krycím jménem Gerboise Bleue, účinky výbuchu byl kromě rozsáhlého arsenálu válečné výzbroje vystaven také celý zvěřinec a 150 alžírských zajatců (podle údajů alžírské televize, o kterých informovala francouzská tisková agentura - AFP - v Paříži 11.5.1985)
- v letech 1960 a 1961 následovaly tři další atmosférické pokusy a potom byly pokusy přemístěny do podzemí

USA, SSSR a Velká Británie podepsaly v roce 1963 smlouvu o částečném přerušení atomových pokusů. Tato smlouva zakazovala jaderné pokusy v atmosféře. V té době se sovětský vládní předseda Chruščov dohodl s Čínou, že Rusko bude podporovat čínský program jaderných zbraní, pokud se k dohodě, která zakazuje jaderné pokusy, Čína přidá. Krátce poté Chruščov od této nabídky odstoupil a Čína na to reagovala tím, že k smlouvě o přerušení jaderných pokusů nepřistoupila.

## Čína:

16. října 1964 odpálila Čína v atmosféře atomovou bombu s trhací silou 20 kt a stala se tak další atomovou velmocí.

17. června 1967 odpálila 3 Mt vodíkovou bombu.

## Indie:

- asi 20 000 lidí se muselo přemístit z oblasti pouště Pakhran v Rádžastánu a 18.5.1974 tam byla provedena exploze zařízení o síle 15 kt v hloubce 100 m pod zemí
- kódované poselství zasláné do Nového Dillí o úspěchu exploze znělo: „Buddha se směje“

## 4.8. Umělé zdroje IZ

- největší podíl na ozáření z umělých zdrojů má používání ionizujícího záření a radioaktivních látek v lékařství (cca 85 %)
- RTG plíc 1-10 mGy, zubní snímek 10 mGy, panoramatický snímek chrupu 300 mGy
- vážné ohrožení představovaly v 50. – 60. letech nadzemní zkoušky jaderných zbraní
- v roce 1963 testy zakázány od té doby aktivita RN klesá
- dalším zdrojem jsou radionuklidové zářiče  $\gamma$  ( $^{60}\text{Co}$  a  $^{137}\text{Cs}$ ), při neodborné likvidaci zemřelo 19 lidí (5 nehod)
- dalším malým umělým zdrojem IZ jsou nehody družic obsahující Pu (v roce 1964 shořela družice v atmosféře a rozptýlilo se  $6,3 \cdot 10^{14}$  Bq  $^{238}\text{Pu}$  (dávka 0,4  $\mu\text{Sv}$  z inhalace))
- TV zdroje RTG 15 – 25 keV, 5 cm od obrazovky 5  $\mu\text{Gy/hod}$

## 4.9. Radioaktivní odpady

- od ostatních odpadů se tyto odpady liší tím, že jsou radioaktivní
- vzniká při těžbě a zpracování uranových rud, výrobě jaderného paliva, provozu jaderných reaktorů a elektráren, přepracování vyhořelého jaderného paliva, likvidaci jaderných elektráren, při výrobě a používání radioaktivních látek v různých odvětví lidské činnosti
- většina radioaktivních odpadů se zpracovává a po jistou dobu uchovává izolovaně od ŽP

### **Dělení odpadů (podle měrné aktivity a uvolňovaného tepla):**

- nízko aktivní
  - krátkodobé
  - dlouhodobé
- středně aktivní
  - krátkodobé
  - dlouhodobé
- vysoce aktivní ( $2 \text{ kW/m}^3$ )

**Nízko a středněaktivní odpady:** z JE – iontoměniče, filtry, materiály z oprav a údržby, odpad z prádelen pracích oděvů, zamořené oděvy, dekontaminační materiál; ze zdravotnictví – pokusná zvířata, injekční stříkačky, nádobí, vata, chemikálie

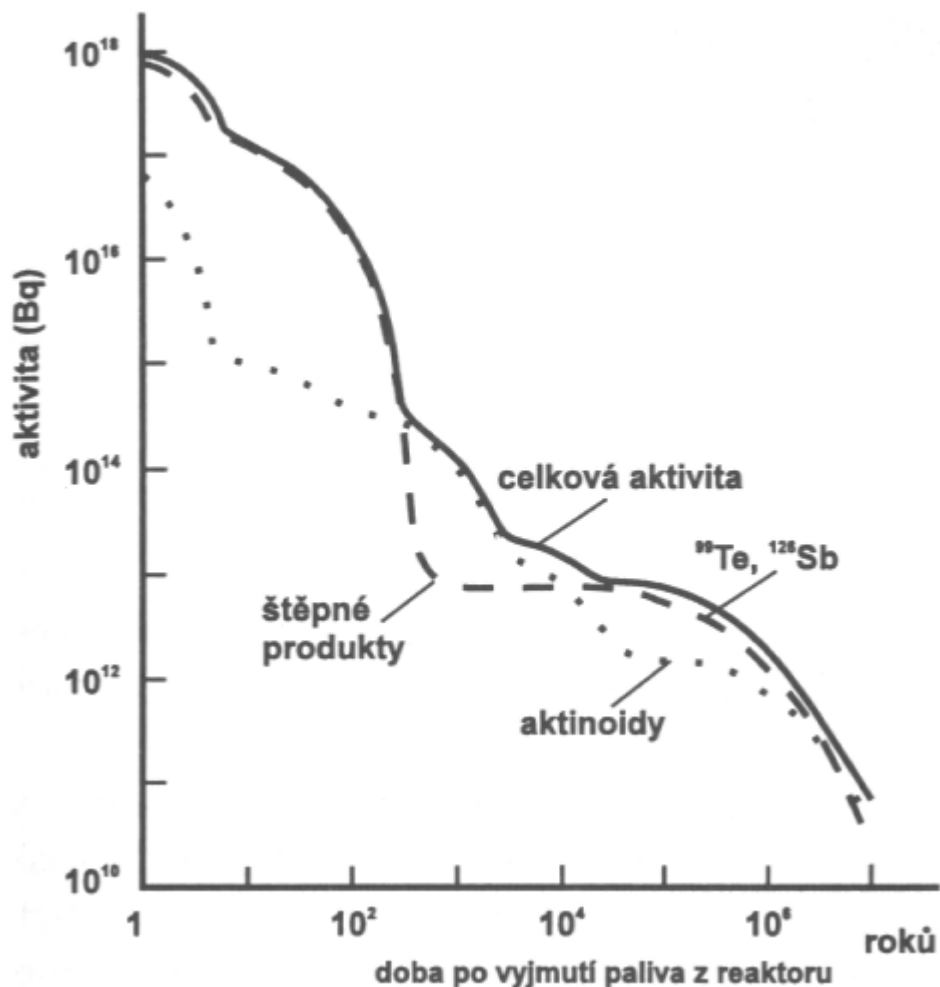
**Vysoko aktivní odpady:** vyhořelé palivo, odpad ze závodů na přepracování vyhořelého paliva (1% hmotnosti všech odpadů ale 90% aktivity odpadů, obsahuje dlouhodobé RN – nutno uložit po dobu tisícovek let)

**Úprava odpadů:** zmenší se jejich objem a převedou se do stabilních nerozpustných forem (cementování (mísení s cementem), bitumenace (mísení s bitumenem – asfaltová živice), vitrifikace (vysušení a vmísení do skloviny – vhodné pro vysoko aktivní odpady)

### **Ukládání odpadů:**

- úložiště musí být zajištěno proti úniku radioaktivních látek do ŽP

- **nízko a středně aktivní odpady** se ukládají do povrchových či mělkých podpovrchových úložišť (dno je mírně skloněné s jílovitým terénem, vysypané pískem, voda se odvádí do monitorované jámky, **středně aktivní odpady** jsou uloženy v úložištích s betonovými jámkami, na podloží ze stabilních krystalických hornin, drenáž ústí do monitorovaných jámek, po zaplnění a uzavření by měla být garantována nepřístupnost po dobu 100 let
- vysoko aktivní odpady se ukládají **do hlubinných úložišť**, do dolů či pod hladinu (v roce 1972 zakázáno), předtím se nacházejí v meziskladu (mokrém – kontejnery v bazénu, suchém – kontejnery ve vhodné budově)
- u nás kontejnery **CASTOR** (litinová válcová nádoba 4,1 m vysoká o průměru 2,7 m a tloušťce stěn 37 cm, hmotnost 131 t, trojitě víko plněné heliem (sleduje se tlak), povrch je kvůli odvodu tepla žebrován



- po 40 letech v meziskladu je aktivita dána především aktivitou štěpných produktů  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  a transuranů, pokud se nepřepřacovává je uloženo do konečných úložišť
- po tisíci letech  $^{90}\text{Sr}$  a  $^{137}\text{Cs}$  zmizí a k aktivitě bude přispívat především  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  a  $^{99}\text{Tc}$
- za  $10^5 - 10^6$  let bude k aktivitě přispívat  $^{229}\text{Th}$  a produkty jeho přeměny, ( $^{229}\text{Th}$  vzniká z mateřského RN  $^{237}\text{Np}$  ( $2,1 \cdot 10^6$  let))