



# **Biologické a genetické účinky ionizujícího záření**

---

# Ionizující záření

- pojem „záření“ – šíření **radiační energie**
- radioaktivita - důsledek radiačního rozpadu, při kterém se mění stav nebo složení atomových jader nuklidů:
  - a) **rozpad vedoucí k dělení jádra na 2 nebo více částic**  
(**Ra** → **Rn** +  **$\alpha$  částice**)
  - b) **rozpady způsobené samovolnou přeměnou jader**  
(**neutron** → **proton** + **elektron**)
  - c) **deexcitace jádra**

**Ionizující záření** – společná vlastnost ionizace hmoty – meziatomový pohyb elementárních částic, které mají dostatečnou energii na **ionizaci atomů**

Při průchodu hmotou dochází k absorpci záření → **řetěz fyzikálních, chemických a biologických změn**, které ovlivňují život buněk, tkání a organismů

**Radiobiologie** – věda o působení záření na biologické objekty

---

# Radiobiologie

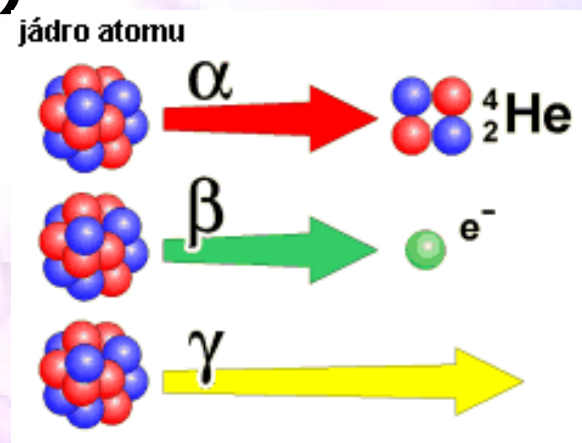
## **Prof. MUDr. RNDr. Ferdinand Herčík (1905-1966)**

- se věnoval také výzkumu účinků záření na buňku a organismus. Jeho práce měly řadu mezinárodních vazeb, což mu přineslo i členství ve **Vědeckém výboru OSN pro zkoumání účinků záření** (včetně období ve funkci jeho předsedy) i funkci místopředsedy rady guvernérů v Mezinárodní agentuře pro atomovou energii ve Vídni.
- **1955 – založení Biofyzikálního ústavu AV ČR v Brně**



# Typy ionizujícího záření

- **elektromagnetické** (vlnová délka  $10^{-17}$  až  $10^{-23}$  nm)– vzniká periodickou změnou elektrického a magnetického pole, které má původ v určitém zdroji a šíří se prostorem – **hmota ve formě energie** – částice **foton** (paprsky X,  $\gamma$ -záření)
- **korpuskulární** – tvoří proud rychle letících elementárních atomových částic, jader atomů, které mohou mít kladný či záporný náboj nebo mohou být neutrální (**elektrony, protony, neutrony,  $\alpha$ -částice**)



# Pojmy a jednotky k hodnocení radiační situace

- **expozice** (tj. míra ionizace vzduchu)
  - **dávka** (tj. množství energie absorbované hmotou)
  - **dávkový ekvivalent** (tj. dávka vážená koeficienty, které charakterizují relativní biologickou účinnost)
  - **aktivita** (tj. veličina používaná ke stanovení množství radionuklidů (becquerel))
-

# Jednotky dávky ionizujícího záření

## Some common units for measuring electromagnetic and particle radiation

There are several units used to measure levels of ionizing radiation.

1. The **Roentgen, R** is a measure of the exposure dose to an ionizing radiation.  
 **$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$**  (coulombs per kilogram) of dry air at STP (standard temperature and pressure)  
**Not used for particle radiation**
  2. The radiation absorbed dose.  
 **$1 \text{ rad} = 0.01 \text{ J/kg}$      $100 \text{ rad} = 1 \text{ Gy}$**   
**Used for all types of ionizing radiation**
  3. The roentgen equivalent man.  
 **$\text{rem} = \text{rad} \times \text{QF}$**  (quality factor)  
which adjusts the exposure to account for the biological effect of various types of radiation.
  4. A convenient unit called the *dose equivalent* is the mSv (millisievert) The ***sievert (Sv)*** is an absorbed dose of 1J/kg (as stipulated by the International Commission on Radiological Protection)  
The units of measurement are mSv (1 mSv = 100 mrem).
-

# Jednotky dávky záření

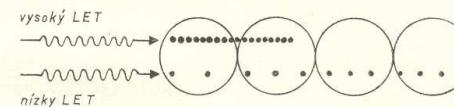
- Jeden gray odpovídá **energii** záření jednoho **joule** absorbované jedním **kilogramem** látky.
    - $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
  - Gray je mírou fyzikálních účinků **ionizujícího záření**, která nevyjadřuje jeho účinky na živé organismy. Např. ozáření celého těla člověka dávkou asi 10 až 20 Gy je smrtelné, ačkoliv odpovídá energii pouze asi 1 kJ, kterou lidský organismus získá asi ze čtvrt gramu cukru. Naproti tomu sievert je jednotka, která má zahrnovat biologické účinky záření, v závislosti na druhu záření a jeho energii.
  - **Sievert** (Sv) je jednotkou dávkového ekvivalentu ionizujícího záření. Je pojmenována po **Rolfu Sievertovi**, průkopníkovi radiační ochrany.
  - 1 Sv je taková absorbovaná dávka, která při jakémkoliv typu ionizujícího záření vyvolá v organické látce stejný biologický účinek. Jednotkou je **J/kg** a vypočítá se jako  **$D \times Q$** , kde D je dávka (Gy) a Q je jakostní faktor, různý pro různé organické látky a jednotlivé druhy ionizujícího záření. Pro foton je  $Q=1$ .
-

# Energie ionizujícího záření

- energie ionizujícího záření se vyjadřuje v elektronvoltech (eV), (keV, MeV)
- 1 eV je energie, kterou získá elektron urychlený potenciálním spádem 1V
- **Lineární přenos energie** (Linear Energy Transfer – LET) vyjadřuje přenos energie na jednotku dráhy, vyjadřuje se v MeV či keV/ $\mu\text{m}$  – vztah k **hustotě ionizace - (hustě x řídce ionizující záření)**

Tabulka č. 1: Druhy záření ve vztahu k hustotě ionizace

Druh záření a energetická rozmezí	LET - hustota ionizace
Fotony, všechny energie	Nízká
Elektrony, všechny energie	Nízká
Neutrony, energie do 10 keV	Vysoká
Neutrony, energie 10 – 100 keV	Vysoká
Neutrony, energie 100 keV – 2 MeV	Velmi vysoká
Neutrony, energie 2 – 20 MeV	Vysoká
Neutrony, energie nad 20 MeV	Vysoká
Protony, energie 2 MeV	Vysoká
Alfa částice, štěpné fragmenty, těžká jádra	Velmi vysoká



Obr. 43. Znárodnenie relatívnej hustoty ionizácie v citlivom objeme pri vysokom a nízkom LET

Závislosť biologického účinku od hustoty ionizácie znázorňuje podľa zásahovej teórie obr. 43. Vidíme, že žiarenie nízkej ionizačnej hustoty produkuje difúznú ionizáciu v celom prostredí, kým častice s vysokým LET majú krátku dráhu a hustú ionizáciu, takže žiarenie nezasiahne niektoré zo znázornených citlivých objemov. Podľa zásahovej teórie sa môže biologický účinok dosiahnuť jednou ionizáciou v citlivom objeme, kým ostatné sú v ňom nepotrebné. Ak platí tento predpoklad — a zdá sa, že pre jednoduché chemické a biologické systémy áno —, žiarenie s níz-



# Typy záření a relativní biologický účinek (RBU)

## DRUH ŽIARENIA

Použitý druh žiarenia a jeho energia rozhodujú nielen o priestorovom rozložení dávky, ale aj o biologickom účinku žiarenia. Na vyjadrenie biologickej účinnosti žiarenia sa používa pojem **RBE — relatívny biologický efekt**. Faktor RBE udáva, koľkokrát je skúmané žiarenie biologicky účinnejšie ako lúče X alebo lúče  $\gamma$ . Vyjadruje sa pomerom dávok žiarenia ( $D$ ) udanými v jednotkách rad, ktoré majú rovnaký biologický účinok:

$$RBE = \frac{D_{X \text{ alebo } \gamma}}{D_{\text{porovnávané lúče}}}$$

Predpokladajú sa pritom rovnaké ožarovacie podmienky — intenzita žiarenia, obsah kyslíka, zloženie prostredia a pod. Približné hodnoty RBE sú:

lúče X a lúče $\gamma$	1
lúče $\beta$	1
lúče $\alpha$	10 — 20
pomalé a rýchle neutróny	5 — 10
protóny	10

Z týchto údajov vyplýva, že napr. rovnaká absorbovaná dávka žiarenia  $\alpha$  je 10 — 20-násobne biologicky účinnejšia ako rovnaká dávka žiarenia  $\gamma$ .

Pri každom druhu žiarenia sa faktor RBE mení pri zmene energie lúčov i pri zmene absorbujúceho biologického materiálu. Udávané hodnoty faktorov RBE sú len približné. Rozdiely sú aj pri fotónoch, ktorých základný faktor sa rovná hodnote jeden:

rtg lúče (200 kV)	1
lúče $\gamma^{60}\text{Co}$	0,8
lúče X (22 MeV)	0,7

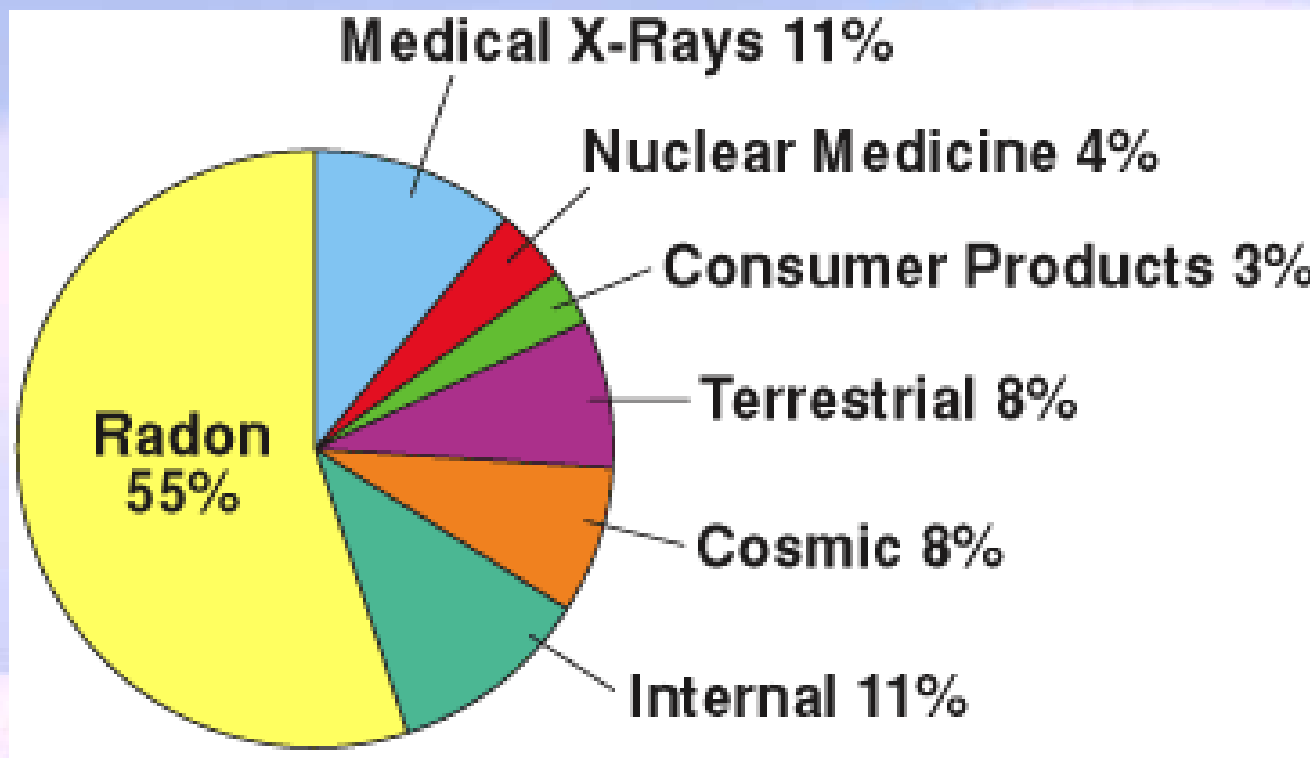
# Zdroje záření

- Po celou dobu trvání a evoluce života na Zemi jsou všechny organismy vystaveny ionizujícímu záření z **přírodních zdrojů** - z kosmického záření a z přírodních radionuklidů. Stejně je tomu i po celou dobu existence člověka. Od začátku 20.stol., po objevu rtg záření a radioaktivity, přistupuje k přírodním zdrojům i řada **umělých zdrojů** ionizujícího záření, které se stále častěji využívají v mnoha oborech medicíny, výzkumu i průmyslu. Podle svých fyzikálních a chemických vlastností způsobují zdroje ionizujícího záření buď **vnější** nebo **vnitřní ozáření**. **Vnější ozáření** způsobují zdroje nacházející se vně organismu, **vnitřní ozáření** je způsobeno zářením z radionuklidů, nacházejících se v lidském těle. Způsob ozáření a dávky záření dále závisejí na výskytu a pohybu jednotlivých zdrojů (přírodních i umělých) v životním prostředí.
-

# Zdroje ionizujícího záření

a) přirozené

b) umělé (defektoskopie, diagnostika, léčba, energetika)





# Radon a jeho účinky

- **Zdroje radonu**  
*(geologické podloží, stavební materiál, podzemní voda)*
  - **Radon a dům**  
*(Radon se hromadí pod základy domu a dosahuje vysokých koncentrací)*
  - **Vlastnosti a účinky radonu na lidský organismus**  
*(Radioaktivní plyn a jeho rozpadové produkty zůstávají v plicích a zhoubně působí na lidský organismus.)*
  - Dle dlouhodobých výzkumů a statistik se dá konstatovat, že ze sta případů onemocnění rakovinou plic přichází 84 % na vrub kouření a zbývajících 16 % právě na choroby z ozáření radonem a jeho rozpadovými produkty.
  - **Radon a ochrana**  
Existují dva základní pohledy na tuto problematiku. Při ochraně objektů se používá buď pasivní nebo aktivní ochrana. Pasivní ochrana spočívá v položení protiradonových izolací do podlah a základových desek. Aktivní ochrana spočívá v prováděném trvalém odvětrání jednotlivých obytných místností pomocí ventilace instalované v celém objektu.
-

# Přirozené zdroje ionizujícího záření kosmické záření

## Cosmic Radiation



**Cosmic radiation** comes from our sun, supernovas, and quasars. Earth's atmosphere is very good at shielding cosmic radiation, but some places on earth receive more radiation than others because the thickness of the atmosphere varies from place to place.



You may also be exposed to cosmic radiation during air travel. Jets that fly above 60,000 feet are required to have a radiation detector in the cockpit to warn the crews of high radiation levels.

To estimate in flight radiation dose, click [here](#).

Table 2

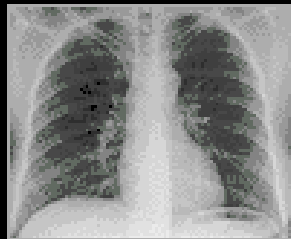
Average Radiation Doses of the Flight Crews for the Apollo Missions

Apollo Mission	Skin Dose, rads
7	0.16
8	.16
9	.20
10	.48
11	.18
12	.58
13	.24
14	1.14
15	.30
16	.51
17	.55

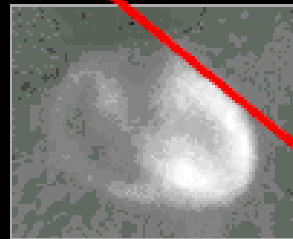
- **Kosmické záření** je proud energetických částic pocházejících z kosmu, pohybujících se vysokou rychlostí a dopadajících do zemské atmosféry. Jedná se především o protony (85 až 90 %) a jádra hélia (9 až 14 %). Zbytek tvoří elektrony, jádra jiných atomů a další elementární částice.
  - **Sluneční záření** – urychlené protony
-

# Využití ionizujícího záření v lékařství

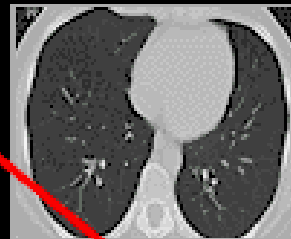
## IONIZING MODALITIES



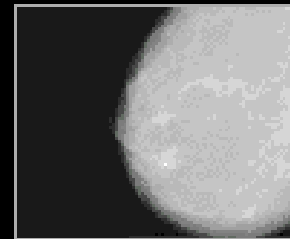
X-ray



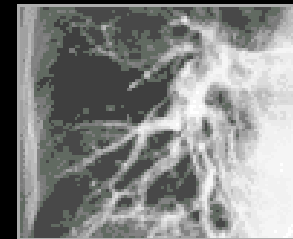
Scintigraphy



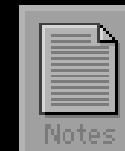
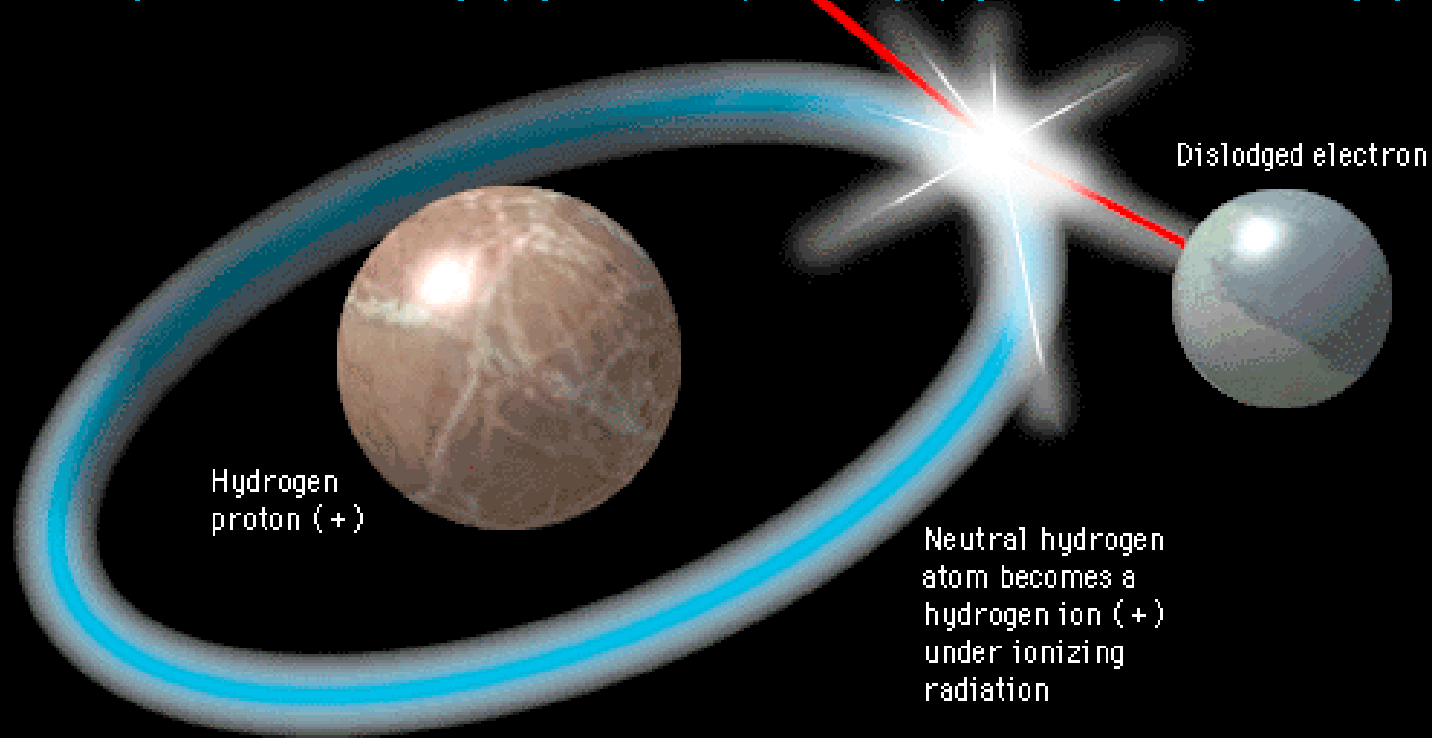
Computed tomography



Mammography



Angiography





Tab. 34. Ozáření při radiodiagnostických vyšetřeních

Vyšetření	$H_E$ (mSv)	Celkový počet vyšetření v ČSSR za jeden rok	$S_E$ (Sv)	$\overline{H}_E$ na obyv. (mSv)
hlava — krční páteř	0,42	508 000	213	0,59
hrudní páteř	2,65	73 000	194	
bederní páteř	2,92	240 000	700	
kyčle	1,90	101 000	192	
pánev	1,90	54 000	103	
žebra	0,67	230 000	154	
plíce-srdce	0,07	2 520 000	176	
plíce ze štítu	0,70	4 745 000	3 322	
žlučník	1,90	170 000	323	
urografie	3,06	128 000	392	
mamografie	10,4	18 000	187	
hor. úsek TÚ	4,50	375 000	1 686	
irigoskopie	12,70	89 500	1 140	

Jsou uvedeny hodnoty  $H_E$  pro průměrného dospělého člověka připadající na jedno vyšetření (u trávicího ústrojí včetně skiaskopie), celkový počet vyšetření  $n$ , kolektivní efektivní dávkový ekvivalent  $S_E$  a průměrný efektivní dávkový ekvivalent  $\overline{H}_E$  na jednoho dospělého obyvatele ČSSR za rok.



## • **Radiační dávky**

- Ionizující nebezpečné záření vyjadřujeme dávkovým ekvivalentem v sievertch. Za rok obdrží člověk přirozenou dávku **2,5 až 3,0 mSv**. K této hodnotě je potřeba připočítat individuální dávkový ekvivalent. Tak např. člověk sledující televizi 1 hodinu denně si připočítá 0,01 mSv za rok, člověk žijící v okolí uhelné elektrárny navíc 0,01 mSv za rok, člověk žijící v okolí jaderné elektrárny 0,002 až 0,005 mSv za rok, atd. (ozáření z mikrovlnky, počítače, mobilu, u lékaře, aj.) Všimněte si, že lidé žijící u uhelné elektrárny jsou paradoxně ozáření více než lidé žijící v blízkosti jaderné elektrárny. Roční limit pro celkové ozáření civilních obyvatel je 1 až 5 mSv/rok (různé zdroje uvádějí různé čísla) a pro pracovníky se zářením 50 mSv/rok. Havárie v Černobylu vyzářila kolem 300 000 mSv.
  - Přírodní pozadí se na některých místech světa **vyznačuje zvýšenou radioaktivitou** hornin. Na těchto místech žijí trvale statisíce lidí bez jakékoliv újmy způsobené zářením. Dávky ozáření a limity lze vidět z následující tabulky.
  - **limit pro pracovníka se zářením 50 mSv/rok**
  - **přírodní radiační pozadí občana ČR 2,5 až 3 mSv/rok**
  - přírodní radiační pozadí občana Kerali v Indii 17 mSv/rok
  - přírodní radiační pozadí občana Guapari v Brazílii 175 mSv/rok
  - přírodní radiační pozadí občana Ramsaru v Iránu 400 mSv/rok
  - RTG střev 4 mSv
  - RTG žaludku 2,4 mSv
  - RTG kyčlí 1,7 mSv
  - pracovník JE Dukovany obdrží 0,4 mSv/rok
  - obyvatelstvo v okolí JE Dukovany obdrží 0,005 mSv/rok
  - 3 lety nadzvukovým letadlem Praha - USA 0,38 mSv/rok
-

# Použití radioizotopů v biologii

- např. značení DNA – autoradiografie
- použití  $^3\text{HdTh}$ ,  $^{32}\text{P}$

## Metody stanovení délky buněčného cyklu.

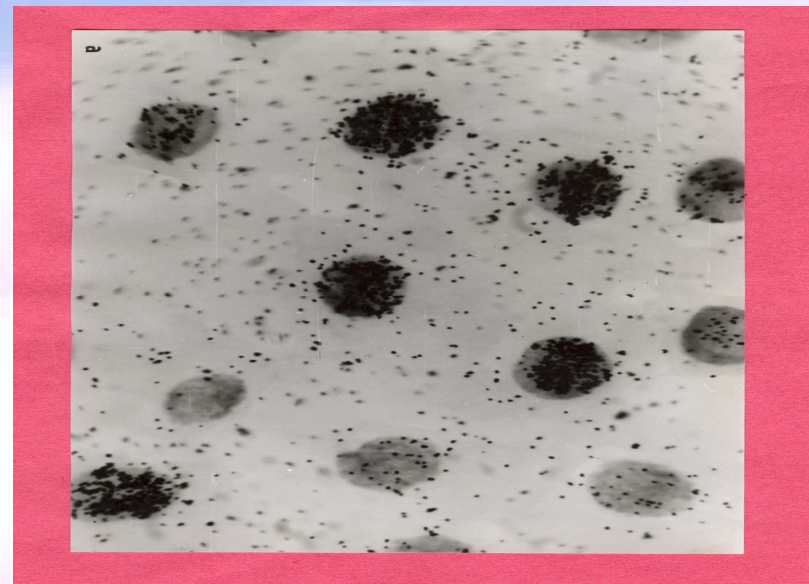
### a) metody autoradiografické.

#### Princip autoradiografické metody stanovení délky buněčného cyklu:

- hodnocení četnosti značených mitóz v závislosti na čase

#### Postup:

1. Kultivace buněk v roztoku obsahujícím radioaktivní látku. (pulzní značení)
2. Odběr materiálu, fixace (usmrcení buněk).
3. Hydrolyza v 1 N HCl při 60 °C.
4. Barvení chromosomů v Schiffově reagens (Feulgenova reakce).
5. Zhotovení roztakových preparátů - sušení.
6. Nanášení radioaktivní emulze (dipping, stripping metoda) - Ilford, Kodak.
7. Expozice ve tmě (10 - 21 dnů).
8. Vyvolávání, ustalování, vypírání autoradiogramů.
9. Hodnocení autoradiogramů.
10. Grafické vyjádření počtu značených mitóz v závislosti na čase, odhad parametrů jednotlivých fází buněčného cyklu.



# Ionizující záření a jaderná energetika

- výpustě jaderných elektráren
- radioaktivní odpad  
(96 % uran 235, 1% plutonium, izotopy stroncia a cesia)  
**Dukovany - 56 tun ročně !!!**
- havárie – únik radioaktivních látek



# Havárie jaderné elektrárny v Černobylu



- **Černobyl** – duben 1986
- únik radioaktivity  $1-2 \cdot 10^{18}$  Bq
- **ekvivalent 90 atom. bomb** svržených na Hirošimu
- evakuace 135 000 obyvatel/30 km
- kolektivní dávka  $1,6 \cdot 10^4$  Sv

**Příčiny:** odpojení automatického havarijního systému, provoz na nepřipustně nízkých hladinách výkonu, selhání obsluhy

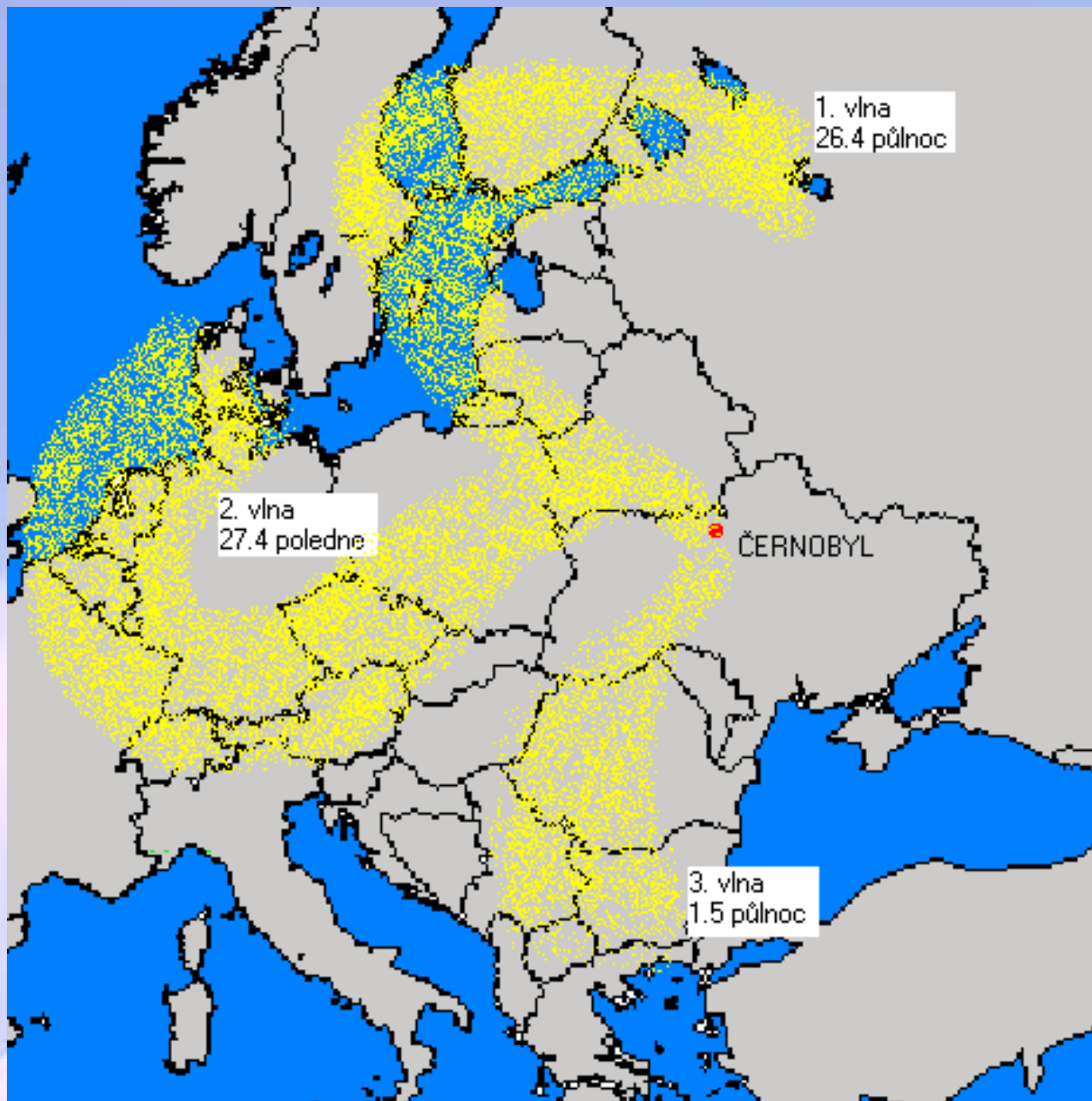
---

- **Černobylská havárie** se stala 26. dubna 1986, v černobylské jaderné elektrárně na Ukrajně (tehdy část Sovětského svazu). Jde o nejhorší jadernou havárii v historii jaderné energetiky. Během riskantního pokusů tehdy došlo k přehřátí a následné explozi reaktoru a do vzduchu se uvolnil radioaktivní mrak, který postupoval západní částí Sovětského svazu, Východní Evropou a Skandinávií. Byly kontaminovány rozsáhlé oblasti Ukrajiny, Běloruska a Ruska, což si vyžádalo evakuaci a přesídlení asi 200 000 lidí. Přibližně 60 % radioaktivního spadu skončilo v Bělorusku. Nehoda zvýšila obavy o bezpečnost sovětského jaderného průmyslu, zpomalila na mnoho let jeho expanzi a zároveň nutila sovětskou vládu přehodnotit míru utajování. Nástupnické státy po rozpadu Sovětského svazu – Rusko, Ukrajina a Bělorusko dodnes nesou břímě pokračujících nákladů na dekontaminaci a léčení nemocí způsobených černobylskou havárií. Je obtížné přesně zaznamenat počet úmrtí způsobených událostmi v Černobylu — **odhady se pohybují od stovek po stovky tisíc**. Problém je stále široce diskutován a jeho dlouhodobým dopadům stále nebylo zcela porozuměno.
-

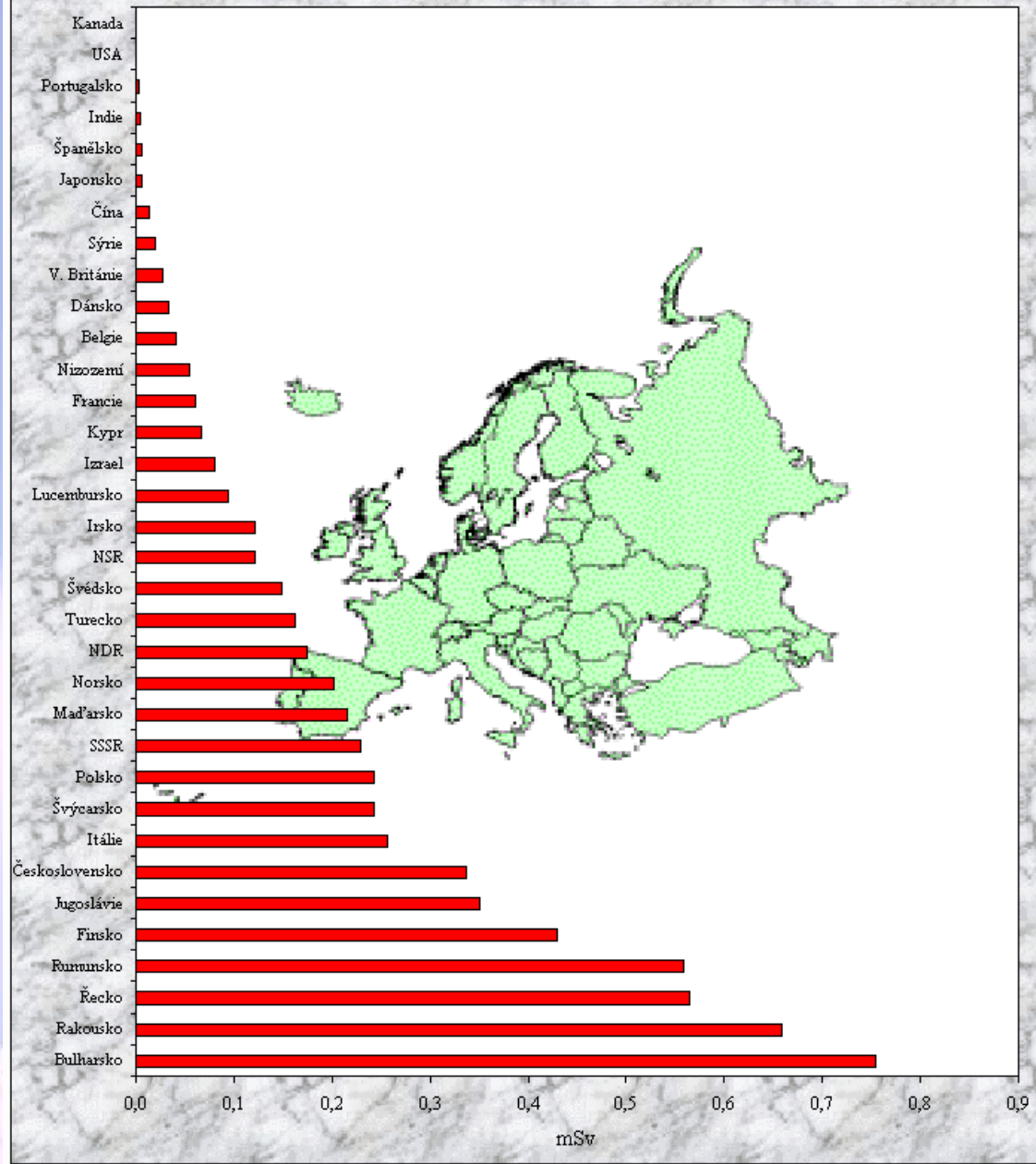
# Černobyl a ČR

- Následky jaderné havárie elektrárny Černobyl byly patrné i na území tehdejší ČSSR. Kontaminované vzdušné masy a s nimi **postupující radioaktivní zamoření se k nám dostaly z východu a později naše území zasáhly ještě jednou poté, co se vzdušná vlna odrazila od Alp a putovala zpět směrem na Polsko.**
  - První znaky signalizující radioaktivní zamoření v důsledku příchodu kontaminovaných vzdušných mas, přicházejících z Černobylu, zachytili pracovníci [Jaderné elektrárny Dukovany](#), a to v průběhu noci z 29. 4. na 30. 4. 1986. Později toho dne také započala měření Krajských hygienických stanic a pracovišť Institutu hygieny a epidemiologie.
  - Ze zdravotního hlediska nejdůležitějšími radioaktivními látkami způsobující radioaktivní zamoření byly **cesium a jód**. Jód s poločasem rozpadu 8 dní mohl být potenciálně nebezpečný pouze v prvních dnech po havárii. **Cesium s poločasem rozpadu 30 let se dostalo do potravinového řetězce. Nejvyšší** objemové aktivity jódu na našem území byly naměřeny ve dnech 30. 4. a 1. 5. 1986.
  - Úřady v ČSSR vyvíjely snahu **omezit radioaktivní zamoření potravin**, když největší kontaminace radioaktivním jódem byla očekávána u mléka a čerstvé listové zeleniny. Dne 3. května bylo rozhodnuto o preventivních opatřeních ke snížení následků jaderné havárie, například při krmení dojnic. Podle věrohodných zpráv ale nebyla vždy správně uplatňována.
  - Negativním následkům jaderné havárie na zdraví občanů se však podařilo zabránit – v některých případech hrozilo překročení zásahových úrovní obsahu jódu v mléce a mléko bylo vyřazeno z konzumace. Po 15. květnu již aktivita jódu v mléce nikde nepřesáhla úroveň 1000 Bq/l. Zároveň bylo doporučeno uvolnit a spotřebovat přednostně všechny zásoby sušeného a kondenzovaného mléka.
-





### Zvýšení průměrné radiální dávky rok po černobylské havárii



- Za jednoznačně prokázaný pozdní účinek havárie v Černobylu, jehož příčinou je radioaktivní zamoření, je považován **zvýšený výskyt rakoviny štítné žlázy u jedinců ozářených v dětském věku (tzn. do 18 let věku)**. Šlo o děti z Běloruska a v menší míře z Ruska a Ukrajiny, které byly zasaženy radioaktivním jódem (I131) jak vdechnutím, tak zejména v důsledku pití mléka od krav, které se pásly na kontaminované travě.
  - Jaderná havárie v Černobylu měla své následky – v průběhu let 1992 až 2000 bylo ve zmíněných zemích diagnostikováno přibližně 4000 případů **rakoviny štítné žlázy** u dětí a mládeže ve věku do 18 let. Z toho celkem 9 pacientů (8 v Bělorusku, 1 v Rusku) zemřelo na rakovinu štítné žlázy. Neexistují data, která by potvrzovala výskyt rakoviny štítné žlázy mezi dospělými.
  - Ve skupině přímých likvidátorů jaderné havárie (tedy zaměstnanci, hasiči, záchranáři, asanační pracovníci, atd.), kteří byli zasaženi vyšší dávkou radiace (v průměru 107 mSv), byla zaznamenána **zvýšená úmrtnost způsobená leukémií**, jinými nádorovými nemocemi či nemocemi oběhového systému vyvolanými radiací v důsledku jaderné havárie. Počet takovýchto úmrtí byl odhadován na zhruba 230.
-

- **Odborníci radikálně snížili počet obětí Černobylu**

- **Trosky Černobylu stále ohrožují lidi žijící okolo jaderné elektrárny.**

foto: <http://www.seminaire-sherbrooke.qc.ca>

- Odborníci odhadují, že v souvislosti s výbuchem v ukrajinské jaderné elektrárně Černobyl, zahynuly asi 4 tisíce lidí. Podstatně tak snížili předešlé statistiky, jež hovořily o desítkách tisících mrtvých. Informaci zveřejnila OSN.

- 6.9. 2005 16:22

- **VÍDEŇ - Ozáření přímo podlehl 59 lidí, z toho dva lidé zahynuli při explozi a 28 dalších ještě v roce 1986. Dalších 3940 zahynulo během následujících měsíců a let na rakovinu.**

- **"Celkově mohlo kvůli vystavení radiaci zemřít 4000 lidí,"** píše se ve zprávě, která by měla být v úterý a ve středu představena na mezinárodní konferenci jaderných expertů ve Vídni. Podle ní vysoká dávka záření zasáhla asi 600 tisíc osob. Šlo většinou o pracovníky elektrárny, záchranáře, hasiče a obyvatelé žijící v okolí vybuchlého reaktoru.

- "Dopady neštěstí na lidské zdraví byly strašlivé, ale celkově vzato nebyly jeho účinky na veřejné zdraví zdaleka tak vážné, jak se myslelo původně," uvádí ve zprávě Michael Repacholi ze Světové zdravotnické organizace (WHO). Zpráva uvádí, že míra radiace v 30 kilometrovém okruhu u Černobylu se dostává do běžných hodnot.

- **Výbuch Černobylu je pokládán za největší neštěstí v jaderné elektrárně ve světě. Pochybnosti stále vyvolává stav sarkofágu, který byl narychlo nad vyhořelým reaktorem vybudován.**
-

## Stupnice hodnocení jaderných událostí

INES dělí nehodové události zásadně na **nehody** (stupně 1, 2, 3), neohrožující okolí a za branou elektrárny či závodu nevyžadující žádná mimořádná opatření, a na **havárie** (stupně 4, 5, 6, 7), vyžadující v důsledku většího úniku radioaktivity do okolí opatření, obsažená v přijatých havarijních plánech. Každá účastnická země je povinna v přesně

stanoveném termínu o **každé** nehodě či havárii informovat koordinační centrum MAAE, které ji ohodnotí určitým stupněm INES vždy podle jejího nejhoršího dopadu na okolní životní prostředí, na prostředí v objektu a jeho bezpečnostní systém. Ústředí dostává z různých míst zprávy o nehodách a provozních poruchách, které jsou pod úrovní vážných nehod (INES-3). Havárie s účinkem na okolí (INES-4) jsou výjimečné. Havárie stupně 5 byly dvě: Windscale a Three Mile Island, havárie stupně 6 žádná. Zatím nejzávažnější událostí za posledních dvanáct let zůstává jako ojedinělá havárie Černobylu...

## Havárie jaderných elektráren

### INES-4

Saint Laurent (1969, 1980)

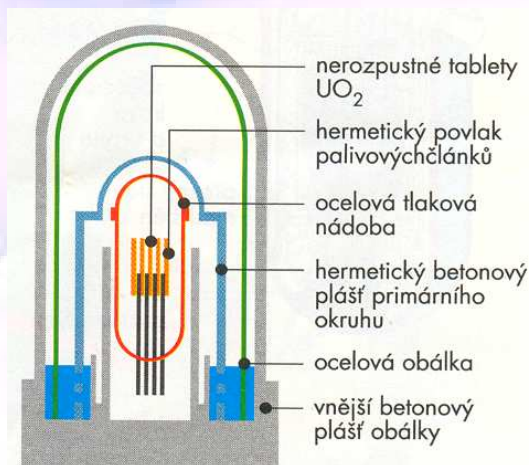
Jaslovské Bohunice (1977)

### INES-5

Three Mile Island (Harrisburg)

### INES-7

Černobyl (riziko 1 : 20 000 let)



Šest bariér uzavírá štěpné produkty v reaktorech se zvýšenou jadernou bezpečností.

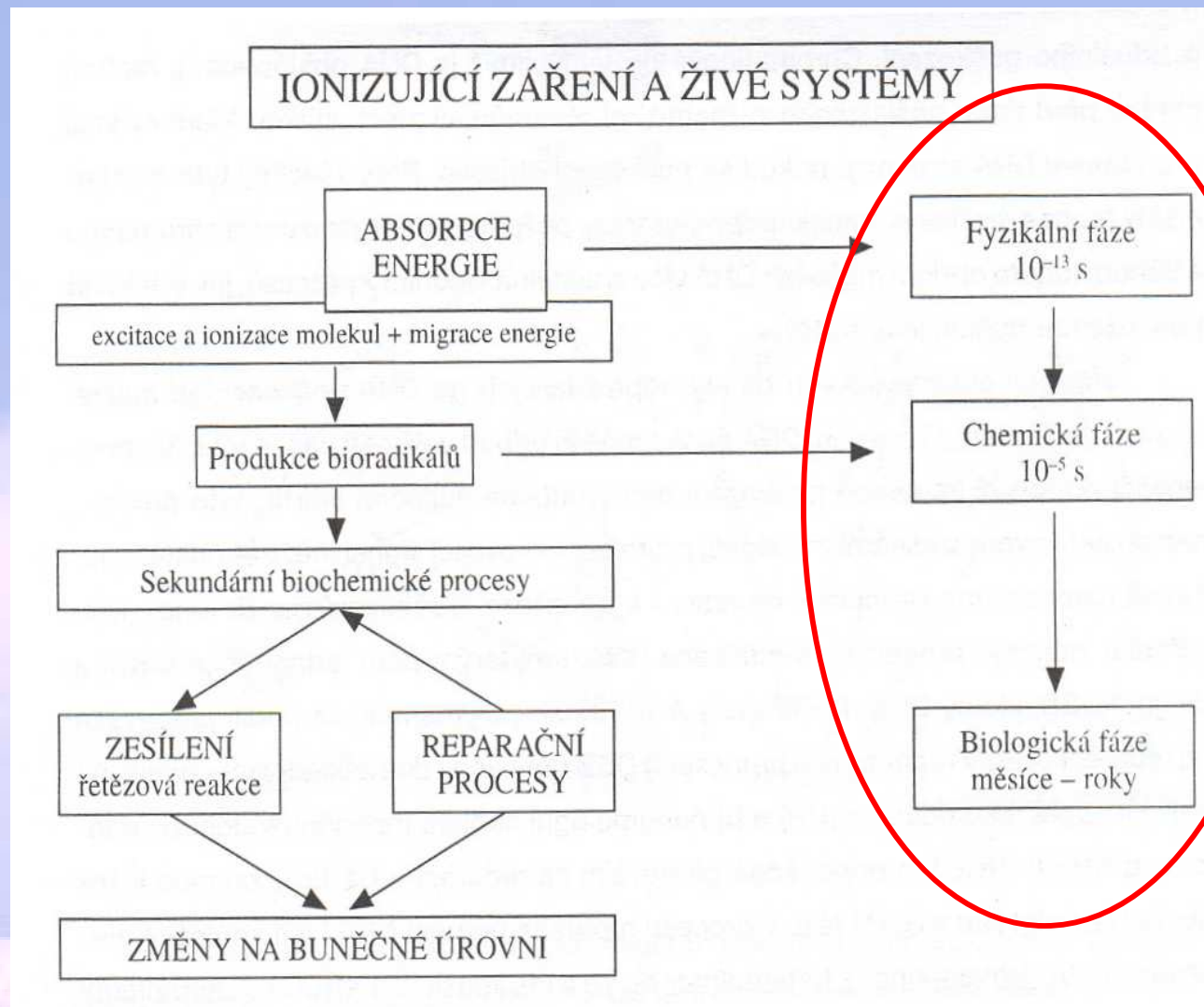
<b>7</b>	<b>Velká havárie</b>	Značný únik radioaktivních látek na velké území, okamžité zdravotní následky, dlouhodobé ohrožení životního prostředí
<b>6</b>	<b>Závažná havárie</b>	Velký únik radioaktivních látek mimo objekt, nutnost využití havarijních plánů k ochraně okolí
<b>5</b>	<b>Havárie s účinky na okolí</b>	Vážnější poškození aktivní zóny, únik 100 až 1 000 TBq biologicky významných radioizotopů, nutnost částečné evakuace okolí
<b>4</b>	<b>Havárie s účinky v jaderném zařízení</b>	Částečné poškození aktivní zóny, ozáření personálu, ozáření okolních obyvatel na hranici limitu
<b>3</b>	<b>Vážná porucha</b>	Ozáření personálu nad normu, menší únik radioaktivity do okolí (zlomky limitu)
<b>2</b>	<b>Porucha</b>	Technické poruchy, které neovlivní bezpečnost elektrárny přímo, ale mohou vést k přehodnocení bezpečnostních opatření
<b>1</b>	<b>Odchylka od normálního provozu</b>	Poruchy nepředstavující riziko, ale odhalující nedostatky bezpečnostních opatření
<b>0</b>	<b>Událost bez významu pro bezpečnost</b>	Nejběžnější provozní poruchy, bezpečně zvládnuté

# Působení záření na hmotu

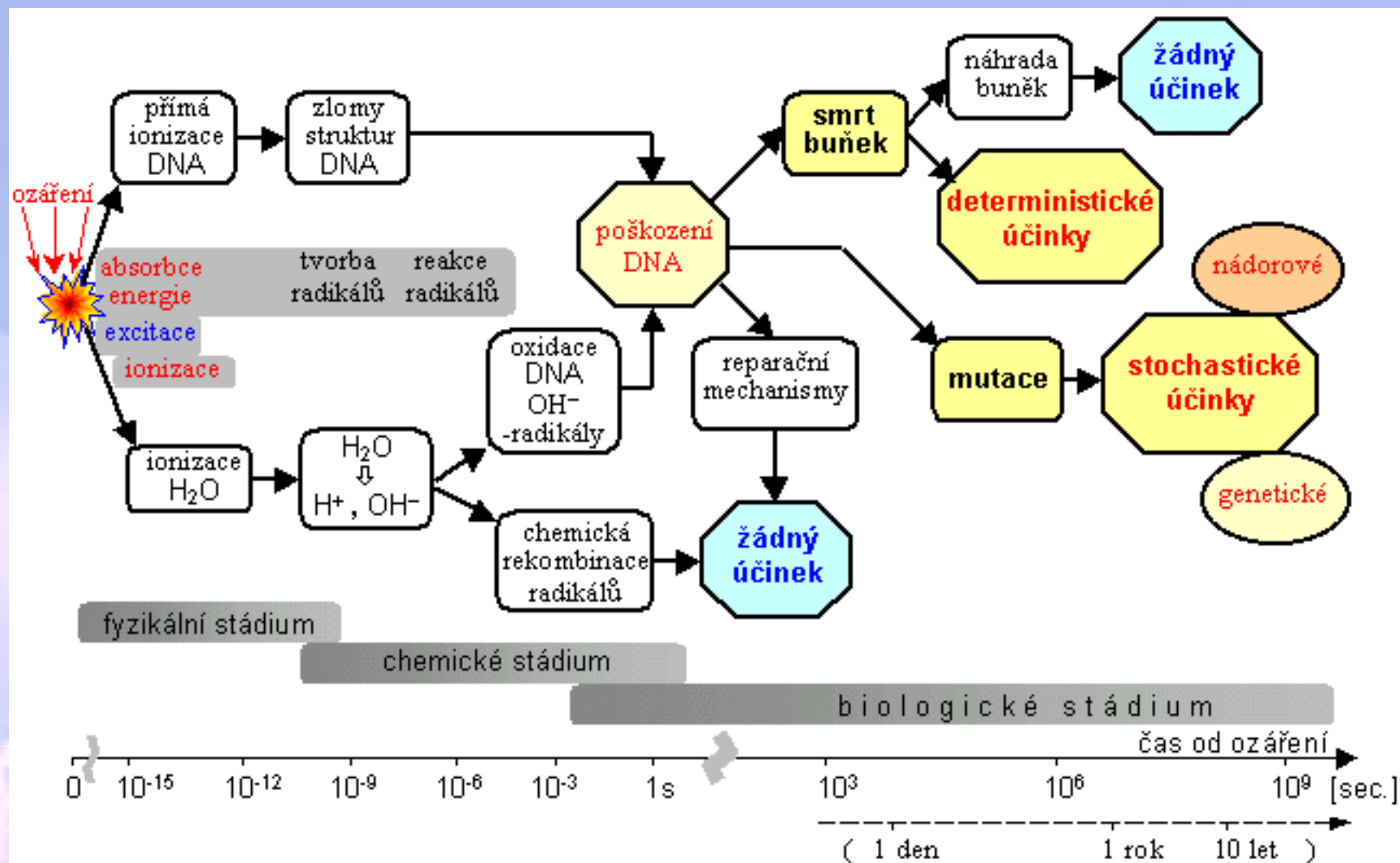
- **Ionizujícím zářením nazýváme takové záření, jehož kvanta mají natolik vysokou energii, že jsou schopna vyrážet elektrony z atomového obalu a tím látku ionizovat.**

- excitace
  - ionizace
-

# Účinky ionizujícího záření na molekulární a buněčné úrovni



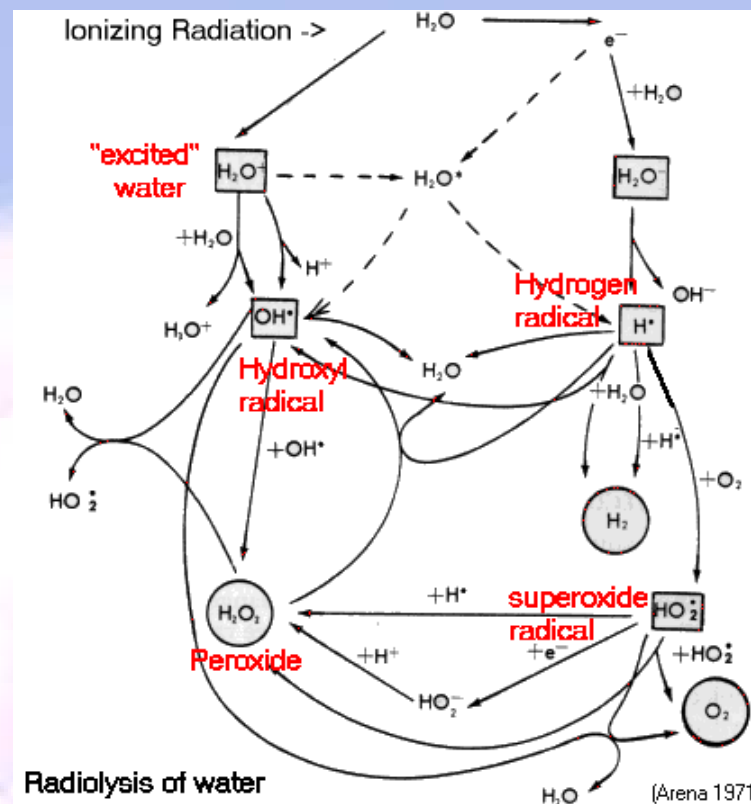
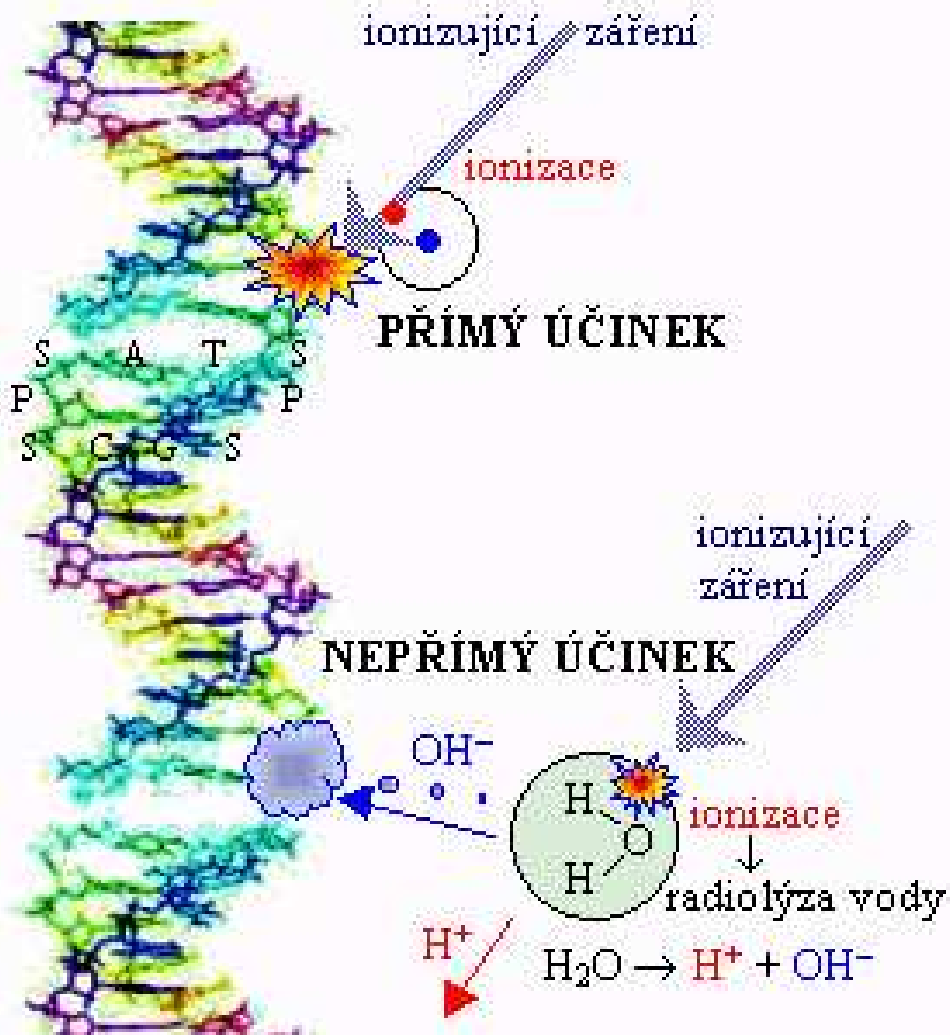
# Účinky ionizujícího záření na molekulární a buněčné úrovni





# Přímý a nepřímý účinek ionizujícího záření

## Molekula DNA



# Biologické účinky ionizujícího záření

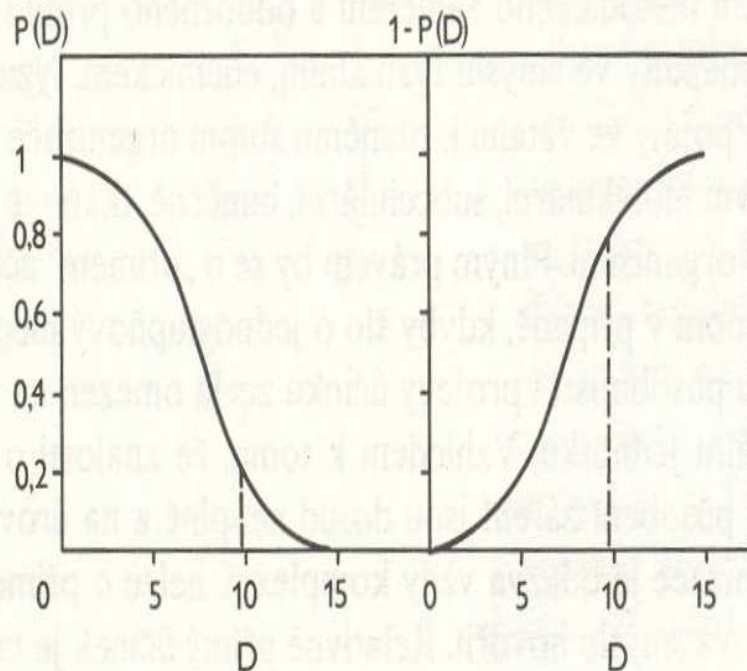
- **dávka 1000 rad – zvýší teplotu těla u člověka pouze o 0,002 °C, ale způsobí smrt !!!**

Vysvětlení:

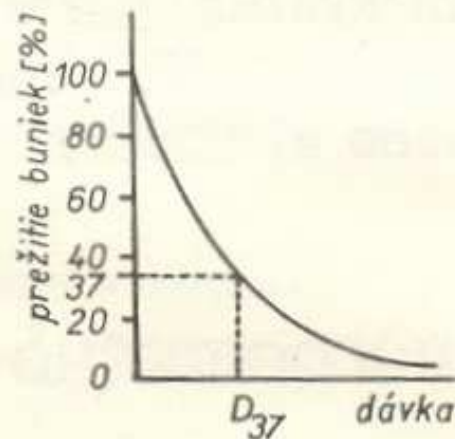
**Zásahová teorie** – vytvořena na základě interpretace křivek přežití

- předpoklad výskytu **citlivého terče** v buňce (jádro), jehož zásah zničí buňku – na poškození stačí jediný zásah
  - na porovnávání radiosenzitivity rozličných buněk se používá **charakteristická dávka  $D_{37}$**  (přežívá 37 % ozářených buněk – **při průměrném 1 zásahu** citlivého terče)
-

# Křivky přežívání



Obr. 5. Základní tvar křivky přežití  $P(D)$  a poškození  $1 - P(D)$  v lineárním systému souřadnic. Čárkováním je vyznačena na vodorovné ose dávka způsobující přežití 20 %, tj. zánik 80 % ozářených elementů.



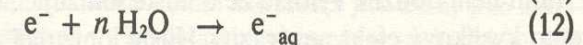
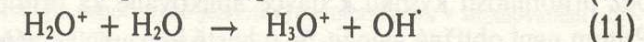
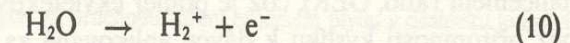
Obr. 33. Krivka přežívania buniek

# Teorie nepřímého účinku záření (radikálová)

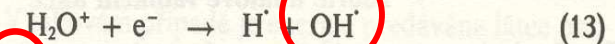
## Biologický materiál – tvořen ze 70 % H<sub>2</sub>O !!!

- **Volné radikály** jsou vysoce reaktivní částice, které mají ve své struktuře nepárový elektron, takže vstupují snadno do řady reakcí, např. s vodíkem nebo s nenasycenými vazbami organických molekul

Ionizující záření způsobuje ve vodě radiolýzu. Při ní se uplatňují zejména tyto reakce (volný radikál se značí tečkou u chemického symbolu):



V reakci 11 vzniká hydroxylový radikál OH<sup>·</sup>, který má oxidační schopnosti, v reakci 12 vzniká hydratovaný elektron e<sup>-</sup><sub>aq</sub>, který redukuje. Hydroxylový radikál, který představuje hlavní oxidační produkt radiolýzy vody, vzniká také jinými reakcemi, např.



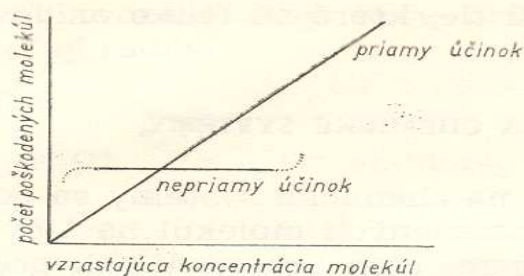
Vodíkový radikál H<sup>·</sup> má zvláštní význam v tom, že může působit redukčně i oxidačně. Za přítomnosti kyslíku vzniká z něho silně oxidačně působící hydroperoxylový radikál HO<sub>2</sub><sup>·</sup>:



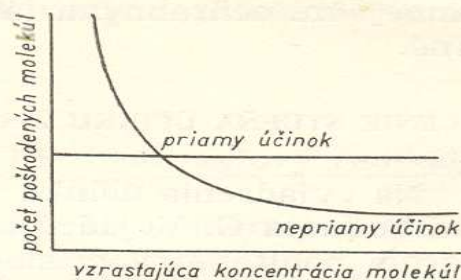
Vzniklé radikály vstupují do dvou typů reakcí, které jsou ve vzájemné kompetici. Mohou jednak reagovat s molekulami rozpuštěné látky, jednak vstupovat do vzájemných reakcí radikálů vzniklých radiolýzou vody (rekombinace radikálů). O podílu těchto dvou procesů a výsledném působení radikálů rozhodují další podmínky.

Při uvážení všech proměnných podmiňujících vznik a další kinetiku volných radikálů je zřejmé, že v ozářené tkáni nemusí dojít k rovnocennému uplatnění redukcujících a oxidujících částic. Při běžných podmínkách ozáření převládá v živých systémech účinek hydroxylových a hydroperoxylových radikálů, které jsou v ozářené tkáni v nadbytku. Tyto radikály zprostředkují dalšími reakcemi peroxidické změny funkčně významných makromolekul v buňce. Teorie nepřímého

# Nepřímý účinek záření – zřed'ovací efekt



Obr. 25. Absolútny počet molekúl poškodených rovnakou dávkou pri priamom a nepriamom účinku



Obr. 26. Relatívny počet molekúl poškodených rovnakou dávkou pri priamom a nepriamom účinku

nepriamym účinkom produktov vody, ktoré vznikajú pri jej rádiolýze (rozklade žiarením). Látky ožarované v roztoku sú citlivejšie na žiarenie ako ožarované v suchom stave, keď sa nemôže prejaviť nepriamy účinok.

## ZRIEĎOVACÍ EFEKT

So vzrastajúcim množstvom látky v roztoku (t. j. s koncentráciou) klesá percento poškodených molekúl, aj keď sa ich množstvo nemení (obr. 26). V rovnakom objeme vody vzniká po ožarení rovnaké množstvo iónových párov, a tým aj produktov ich ďalších reakcií, ktoré inaktivujú len určitý počet molekúl ožiarenej látky. Preto pri vyšších koncentráciách látky v roztoku je poškodenie relatívne menšie, a naopak pri zriedení relatívne vyššie; hovoríme o tzv. **zried'ovacom efekte** — väčšej účinnosti žiarenia na zriedené roztoky.

# Molekulárně biologická teorie účinků ionizujícího záření (Chadwick a Leenhouts 1981)

- předpokládaným terčem v buňce je dvojlátko DNA
- primární efekt záření – **dvojlátkový zlom v DNA (DSB)**
- zlom může vzniknout při průchodu jediné částice či v důsledku průchodu dvou prostorově blízkých ionizujících částic
- počet dvojitých zlomů:  **$N = \alpha D + \beta D^2$**   
(**D – dávka,  $\alpha$ ,  $\beta$  – koeficienty závislé na buněčném prostředí**)

K poškození buňky dochází při kombinaci dvou primárních dějů odehrávajících se na dvojlátkech nukleové kyseliny DNA, tvořící jádro buňky, přičemž poškození je pravděpodobnostně závislé na počtu vzniklých zlomů a na působení reparačních procesů. Částice "řídce" ionizujícího záření, tj. beta a gama, vytvářejí při svém průchodu kritickým místem pouze po jednom primárním narušení (zlomu), takže k definitivnímu vzniku poškození je třeba průchodu **dvou** jednotlivých částic daným místem rychle po sobě - počet těchto poškození pak závisí převážně na druhé mocnině dávky, pro menší dávky je poškození výrazně nižší. Částice "hustě" ionizujícího záření (alfa, neutrony, protony) jsou schopny při jediném průchodu kritickým místem vyvolat dvě a více primárních poruch, což stačí ke vzniku reálného poškození, takže počet poškození, tj. radiační účinek, je zde přímo úměrný dávce záření; poškození zde vzniká snadněji, tyto druhy záření mají **vyšší biologickou účinnost**.

---

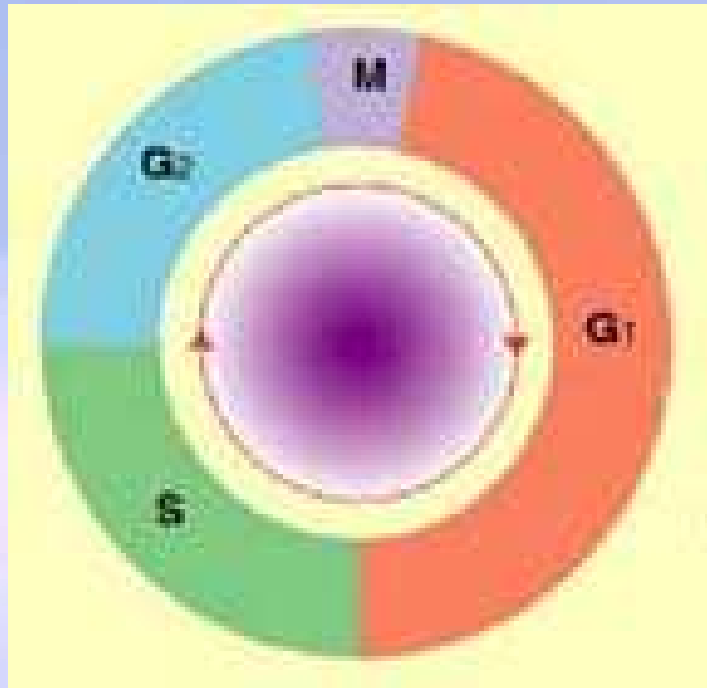
**Vnímavost buňky vůči účinkům ionizujícího záření se mění v průběhu jejího buněčného cyklu – největší je v ranných stádiích mitózy.**

**Počet mitoticky aktivních buněk ve tkáni ovlivňuje citlivost orgánů !!!**

Nejcitlivější:      lymfoidní buňky  
                         hematopoetické buňky  
                         zárodečný epitel  
                         sliznice

# Účinek ionizujícího záření na buňku

## Hlavní typy radiačního poškození buněk



- **intermitotická smrt buňky** (vysoké dávky záření, destrukce jaderné hmoty, porucha mitochondrií, oxidativní fosforylace, narušení iontové rovnováhy)- **nekróza, apoptóza**
- **mitotická smrt** (zástava mitózy, fragmentace chromozomů, chromozomové aberace)
- **zástava syntézy DNA, transkripce DNA**
- **poškození genetického materiálu** →
- **jednořetězcové zlomy DNA**
- **dvouřetězcové zlomy DNA**
- **poškození bazí (thymín !!!)**
- **křížové vazby**



# Strategie eukaryotických buněk na radiačně-indukované poškození DNA

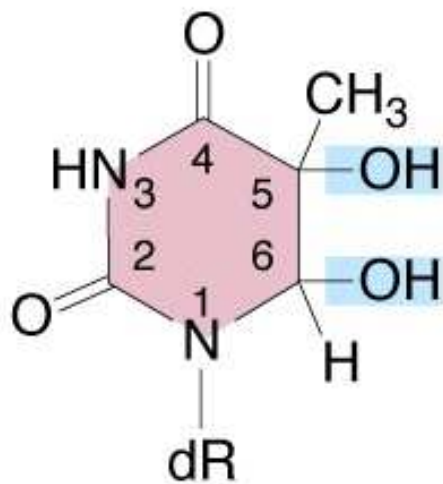
- 1) poznání poškození
- 2) odhad velikosti poškození
- 3) odpovídající odpověď – reparace DNA či indukce buněčné smrti

- **DSB (dvouvláknové zlomy) – rozhodující léze v DNA po účinku ionizujícího záření !!!**

Oprava:

- A) **homologní rekombinace** (G2/M fáze)
  - B) **nehomologní spojení** (G1 fáze)
-

# Oxidativní poškození DNA



Thymidine glycol

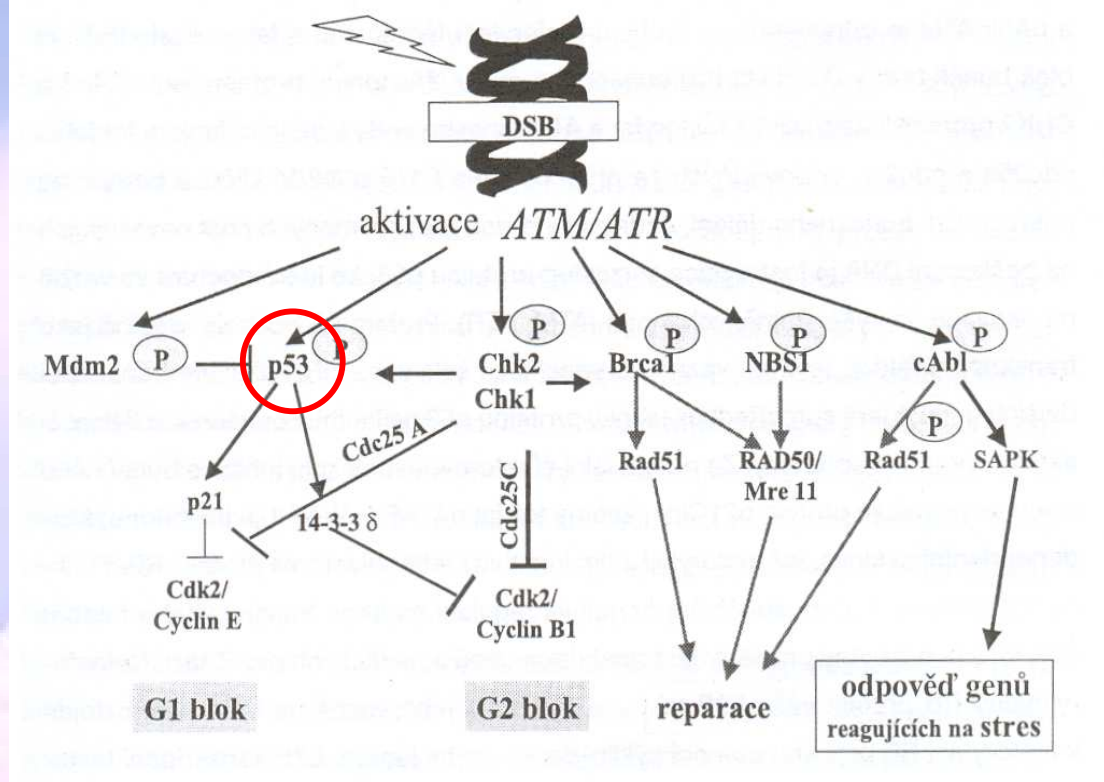


8-Oxo-7-hydrodeoxyguanosine  
(8-oxodG)

# Vliv radiálně indukovaného poškození DNA na reparaci

Zlomy v DNA vedou k aktivaci různých proteinů (kináz), které ve svém důsledku způsobují **inhibici** buněčného cyklu a reparaci poškození nebo **indukci** apoptózy.








Schéma 8: Centrální úloha ATM v buněčné odpovědi na dvojité zlomy DNA způsobené ionizujícím zářením. Upraveno podle Khanna a Jackson.



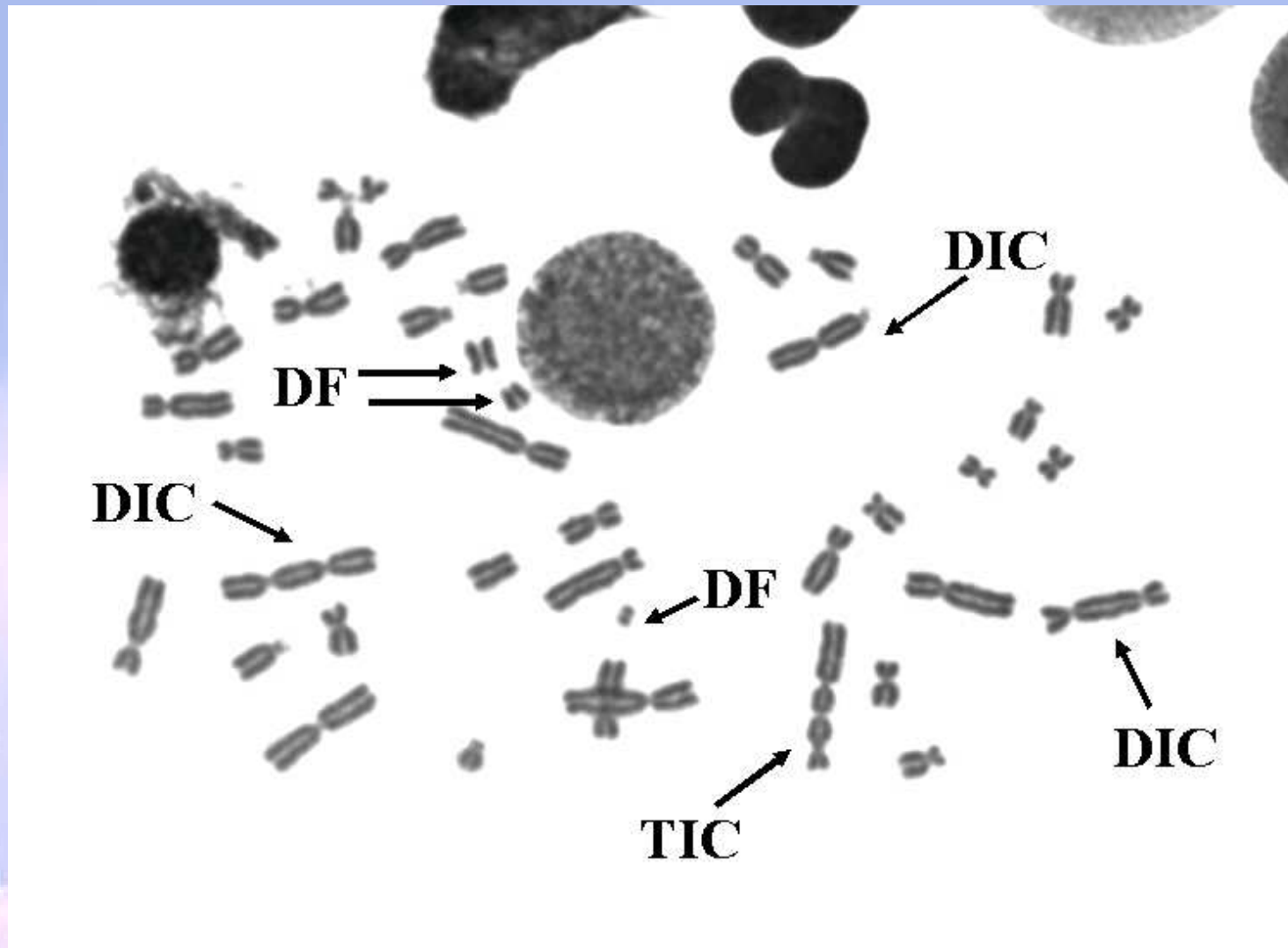
# Účinek ionizujícího záření na chromozomy

Ionizující záření indukuje zejména chromozomové typy aberací !!!

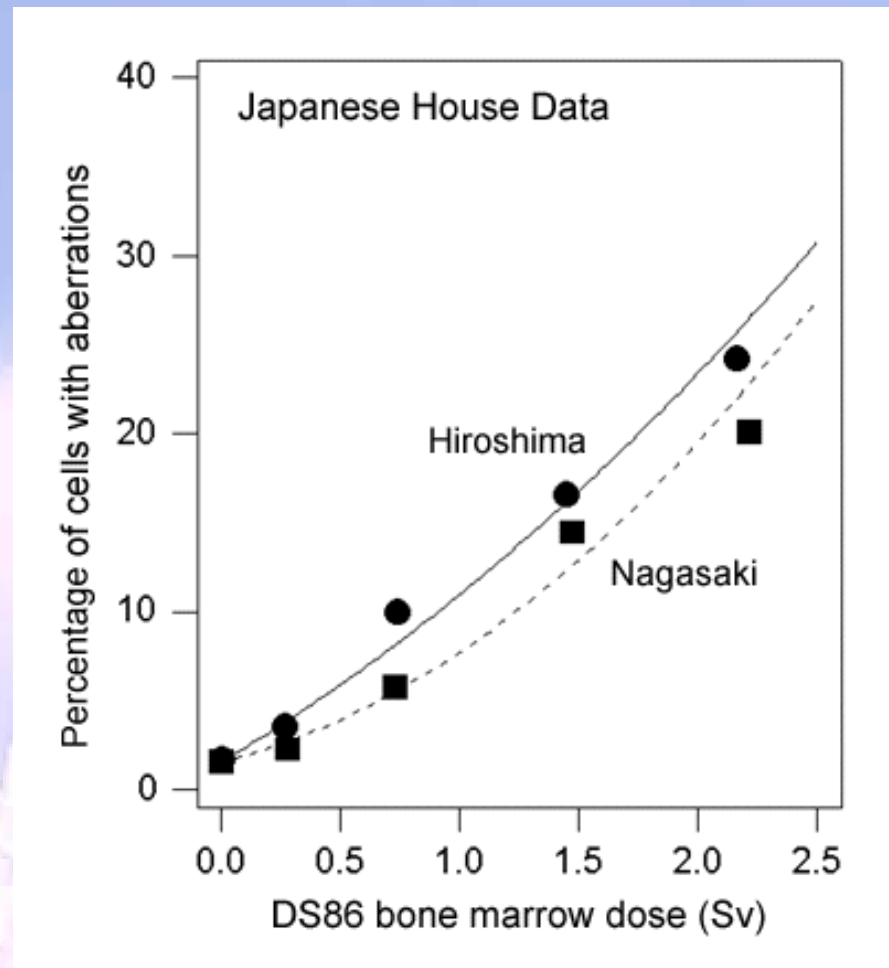
Examples of 2-lesion *Chromosome-type* aberrations

	INTERCHANGE	INTER-ARM INTRACHANGE	INTRA-ARM INTRACHANGE	"BREAK" DISCONTINUITY
A	 dicentric	 centric-ring	 interstitial deletion	
S	 reciprocal translocation	 pericentric inversion	 paracentric inversion	

# Di- a tricentrický chromozom, difragment

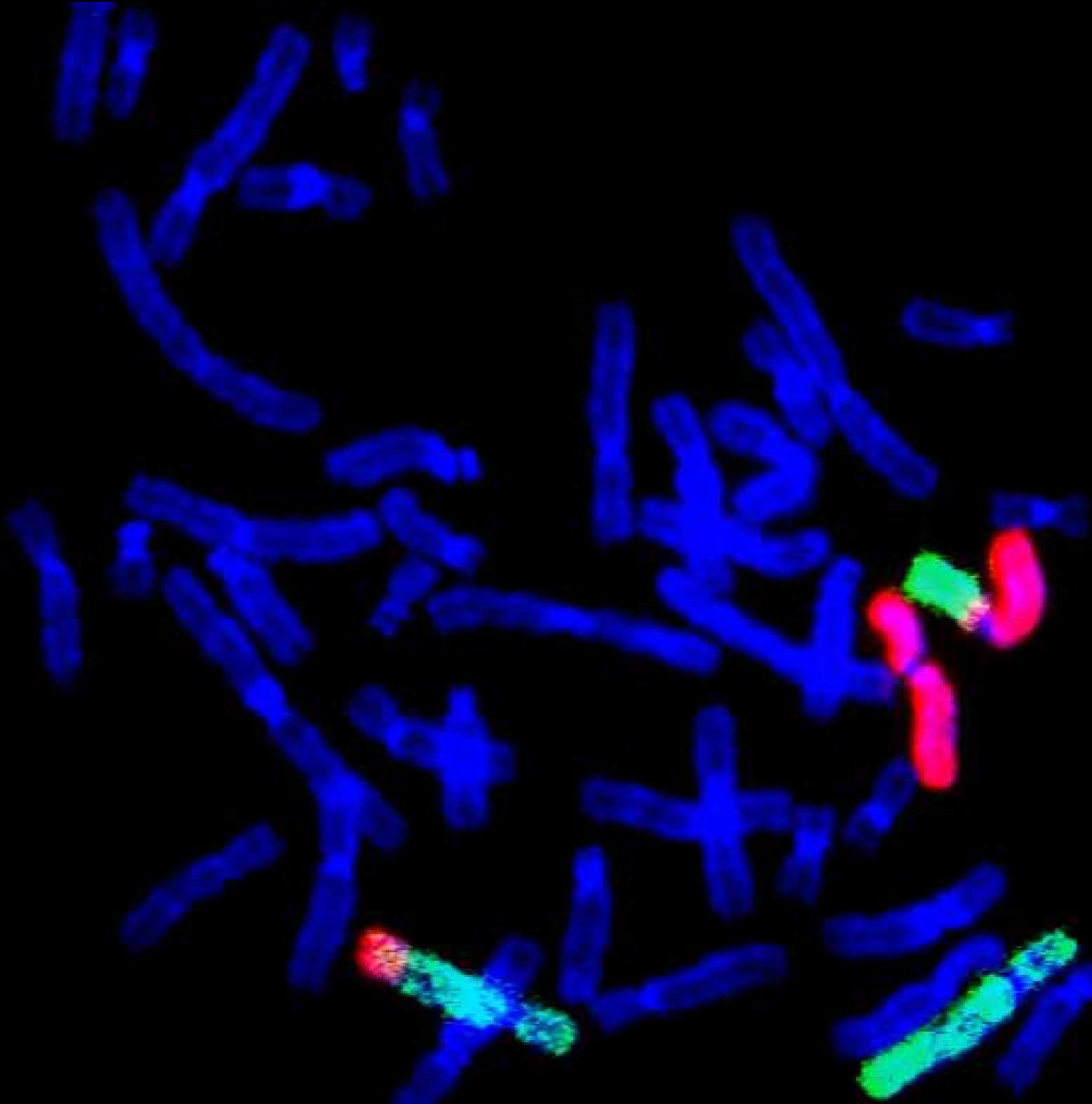


**Relationship between radiation dose and the frequency of cells bearing chromosome aberrations. Japanese house data is based on dose estimates for survivors who reported being inside their houses at the time of the bombing.**

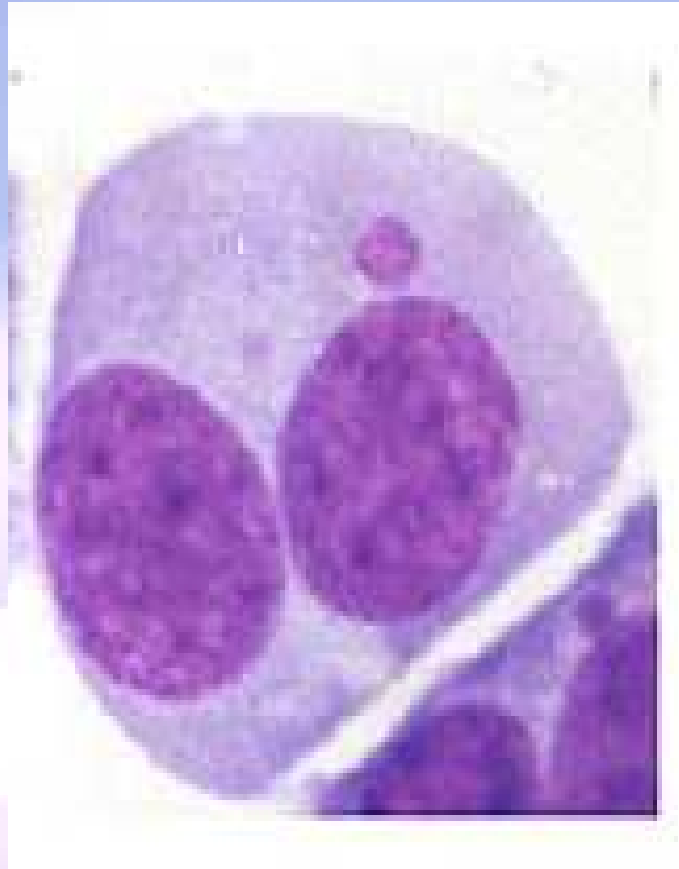


69/99

t(5;11)



# Mikrodádro jako důsledek radiačního poškození chromozomů





# Účinek ionizujícího záření na makromolekuly a buněčné komponenty

- **Bílkoviny** – změny stavby molekul, koagulace, přerušování peptidových vazeb – ztráta funkce bílkovin. Nejcitlivější jsou sloučeniny s –SH skupinou. Enzymy – změna enzymové aktivity, inaktivace.
  - **Glycidy** – depolymerizace, rozpadové produkty.
  - **Lipidy** – působením radikálů vznikají na dvojných vazbách nenasycených mastných kyselin peroxidy. Lipidoperoxidy – změna propustnosti membrán.
  - **Mitochondrie** – omezení tvorby ATP, porucha oxidativní fosforylace
-

# Co ovlivňuje míru radiačního poškození buněk ?

- **druh záření** (řídce ionizující x hustě ionizující, RBU, LET, vnější ozáření x vnitřní ozáření, celotělové x lokální)
- **velikost dávky**
- **expoziční rychlost** – biologický účinek vzrůstá se zvyšováním expoziční rychlosti
- **časový činitel** – ozařování má menší účinek pokud aplikace určité dávky trvá déle (jednorázové ozařování x frakcionované)
- **prostorový faktor**

Pozn: např. při léčbě nádorů – denně se aplikuje dávka 200 - 250 rad do celkové dávky 5000 - 7000 rad v průběhu 6 týdnů

---

## Faktory ovlivňující účinek ionizujícího záření

**Radiosenzibilizátory – látky, které mají schopnost zvyšovat citlivost tkání k ionizujícímu záření**

**1. Chemické senzibilizátory – např. aminonikotinamid, hydroxyurea, daktinomycin, mitramycin**

- při léčbě nádorů (senzibilizační účinek je větší na nádorové buňky)

**2. Kyslík – zvyšuje tvorbu radikálů**

**OER (oxygen effect ratio) – poměr kyslíkového účinku  
Faktor, který udává zvýšení účinnosti záření v přítomnosti kyslíku**

- nádory často hypoxické (rychlý růst), přívod kyslíku zvyšuje radiosenzitivitu

**3. Teplota – pokles teploty zvyšuje odolnost vůči ozařování (pokles parciálního tlaku kyslíku)**

- savci ozařování při nižší teplotě mají menší mortalitu

**4. Pohlaví – samičky většiny druhů jsou méně radiosenzitivní (rozdíl v hormonálních systémech organismů)**

**5. Věk – mladší organismy jsou citlivější na záření jako starší**

**6. Zdravotní stav – podvýživa, infekce, námaha snižuje odolnost**

# Přehled letálních dávek LD<sub>50</sub>

Tabulka č. 10: Přehled letálních dávek podle druhu organismu

Biologický druh	LD <sub>50</sub> [Gy]
Člověk	4–5
Pes	2,5–3
Myš	7–10
Potkan	7–10
Hmyz	100–1000
Houba	300–500
Prvok	1000–3000

# Účinek ionizujícího záření na člověka

- akutní nemoc z ozáření
- akutní lokalizované poškození
- poškození plodu *in utero* → ÚČINKY DETERMINISTICKÉ
- nenádorová pozdní poškození
  
- zhoubné nádory → ÚČINKY STOCHASTICKÉ
- genetické změny

**Stochastické účinky** – důsledkem změny jedné nebo málo buněk

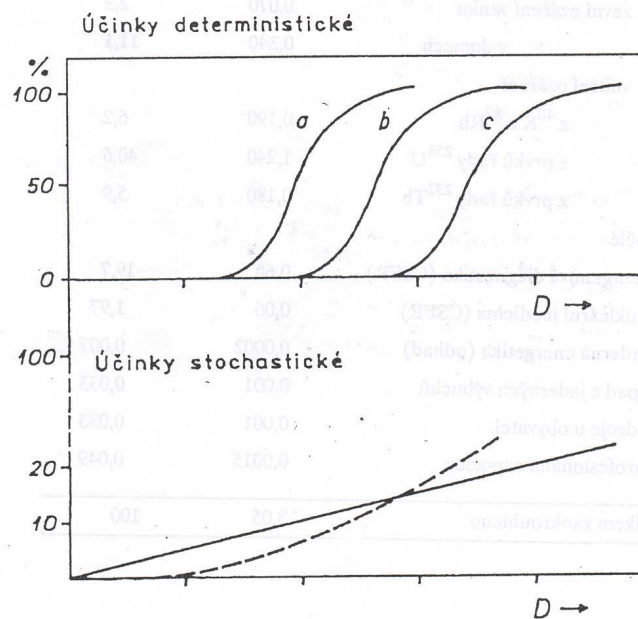
**Deterministické účinky** – důsledkem poškození (zániku) velkého počtu buněk (prahový efekt)

---

**"Každé ozáření zdravé živé tkáně ionizujícím zářením, a to i velmi malou dávkou, může být pro organismus potenciálně nebezpečné svými pozdními stochastickými účinky. Proto je nutno všemi dosažitelnými prostředky snížit dávky záření na minimum."**

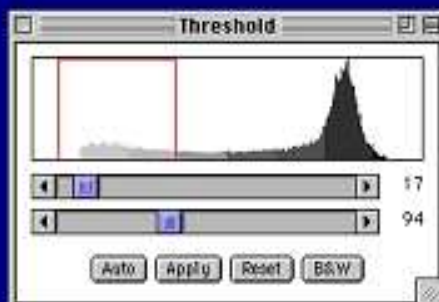
Tab. 1. Přehled hlavních typů biologických účinků ionizujícího záření na člověka

ČASNÉ	POZDNÍ		
	Somatické	Genetické	
Akutní nemoc z ozáření	Nenádorová pozdní poškození	Zhoubné nádory – rakovina kůže – rakovina žaludku	Genetické změny
Akutní lokalizované poškození – akutní radio-dermatitida – poškození fertility	– chronická radiační dermatitida – zákal oční čočky (katarakta) Pozdní následky navazující na akutní poškození	– rakovina štítné žlázy – kostní sarkom – leukémie – bronchogenní karcinom	
Poškození plodu in utero			
DETERMINISTICKÉ		STOCHASTICKÉ	



# Deterministické účinky záření

## Effects with a Threshold



### Most Threshold Effects

are caused when an individual receives a high radiation dose to their whole body or a portion of their body in a short amount of time. Each effect has its own particular threshold dose. No injury occurs below the threshold dose.

### Acute Radiation Syndrome

is an illness that has a threshold of 100,000 mrem. This means that any person will experience the illness if they receive a whole body dose of 100,000 mrem or more in a very short amount of time. As a person's dose increases above the threshold, the severity of the symptoms increases. For humans, a lethal dose is about 450,000 mrem.

# Účinek ionizujícího záření na lidský organismus

## Radiosenzitivita lidských tkání a orgánů

1. Nejcitlivější tkáně a orgány – diferenciace buněk (lymfatický, hemopoetický aparát, zárodečné orgány)
2. Tkáně citlivé na záření – rychle se dělící buňky (tenké střevo, kůže)
3. Tkáně méně citlivé na záření – pomalu se dělící buňky (malé cévy, pojivové tkáně)
4. Nejméně citlivá skupina tkání – nedělící se buňky (játra, kost, svalstvo)



# Bergonieho-Tribondeův zákon

## **RADIOSENZITIVITA – Bergonieho-Tribondeův zákon**

**Radiorezistence stoupá se zvyšováním morfologické a funkční diferenciaci a s poklesem mitotické aktivity buněk**

---

# Práhové dávky u člověka

Tabulka č. 9: Práhové dávky vybraných orgánů a orgánových soustav

Tkáň (orgán)	Dávka (Gy)	Druh poškození
Varle	0,2	Aspermie přechodná až trvalá
Oko	2	Katarakta
Kostní dřeň	1	Útlum krvetvorby
Kůže	6	Dermatitida
Střevo	8	Enteritida
Plíce	8	Pneumonitida, fibróza
CNS	80	Afunkce

# Stochastické účinky záření

## Chance Effects



### Non-threshold Effects

The chance of some radiation-induced effect occurring is assumed to increase as a person's dose increases. Radiation regulations and limits are based on this assumption. Cancer and genetic effects are examples of non-threshold or chance effects.

Exposure to high levels of radiation is associated with an increased risk of **cancer** in later life. Although low radiation levels do not have zero risk, the risk is so low that no physical effects have ever been detected or observed in humans. Additionally, the body can usually repair radiation damage when the exposure is spread out over long periods of time. That is one reason why higher-than-average cancer rates or **genetic defects** are not found in populations living in areas where high background exposure rates exist.

# Nádory indukované ionizujícím zářením

- **rakovina kůže** (prof. expon, jedinci – RTG pracovníci)
- **leukémie** – lékaři, děti ozářené v těhotenství, Japonsko – max. 2 roky po ozáření
- **rakovina štítné žlázy** – u lidí léčených v dětském věku zářením na zvětšení štítné žlázy
- **osteosarkomy** – ukládání radionuklidů do kostní tkáně
- **bronchogenní karcinom** – terčem jsou buňky epitelu dýchacích cest

**Celotělová dávka záření 0,1 Gy vyvolá u skupiny 200 lidí vznik v průměru jednoho zhoubného nádoru !!!**

---

# Akutní nemoc z ozáření

- odpověď organismu na jednorázové ozáření dávkami záření vyššími než **0,7 Gy**
- zahrnuje tři základní syndromy:
  - **Krevní (dřeňová forma)** – celotělové ozáření dávkou 3 až 5 Gy
  - **Střevní forma** – celotělové ozáření dávkou kolem 10 Gy
  - **Nervová forma** – ozáření dávkami několik desítek Gy

Časově se rozlišují 3 fáze – **1. prodromální (nauzea, zvracení, neklid, bolest hlavy, průjem, slabost)**

**2. latentní fáze**

**3. klinická manifestace nemoci z ozáření**

---

# Akutní nemoc z ozáření – časový profil

Tabulka č. 11: Časový a dávkový profil jednotlivých forem akutní nemoci z ozáření

Forma ANO	Prahová dávka	Prodromální fáze	Latentní fáze	Manifestní fáze
Dřeňová	1 Gy	30 minut – 48 hod.	2. den – 3. týden	2. den – 4. týden
Gastrointestinální	8 Gy	10 minut – 48 hodin	3. – 5. den	5. – 8. den
Neurovaskulární	30 Gy	od 5 minut	2. den nebo chybí	2. – 4. den

# Akutní nemoc z ozáření

## **Dřeňová forma (3-5 Gy)**

- nad 300 rad – těžké postižení kostní dřeně
- útlum krvetvorby – postižení kmenových buněk krvetvorby v kostní dřeni
- nevolnost, skleslost, bolesti hlavy
- po období latence přicházejí projevy mikrobiálního rozsevu a krvácení

## **Střevní forma (kolem 8 Gy a vyšší)**

- kritickým orgánem je sliznice tenkého střeva
- příznaky výraznější, závažné obtíže se objevují už 4.- 6. den po ozáření
- krvavé průjmy, příznaky proděravění střevní výstelky

## **Nervová forma (desítky Gy)**

- psychická dezorientace, zmatenost, křeče, bezvědomí, smrt
-

# Působení ionizujícího záření na gamety a na plod

## Gametické mutace:

- klidové oocyty – malá vnímavost k indukci mutací ionizujícím zářením
- **spermie – vnímavější**, mutace se akumulují ve zrajících spermatogoniích  
(250 rad – přechodná sterilita, 500 – 600 rad – trvalá sterilita)

## Poškození plodu:

- nejcitlivější v ranných stádiích, kdy se tvoří základy orgánů
  - a) ozáření mezi oplodněním a implantací (11 dní) – potraty
  - b) ozařování v období zakládání orgánů (38 dní) – morfologické abnormality (mikrocefalie, vrozené srdeční vady aj.)
  - c) po 40. dnu embryo radiorezistentnější – nevyšetřovat těhotné použitím ionizujícího záření !!!!
-



# Léčba nádorů ionizujícím zářením

## Radioterapie zhoubných nádorů

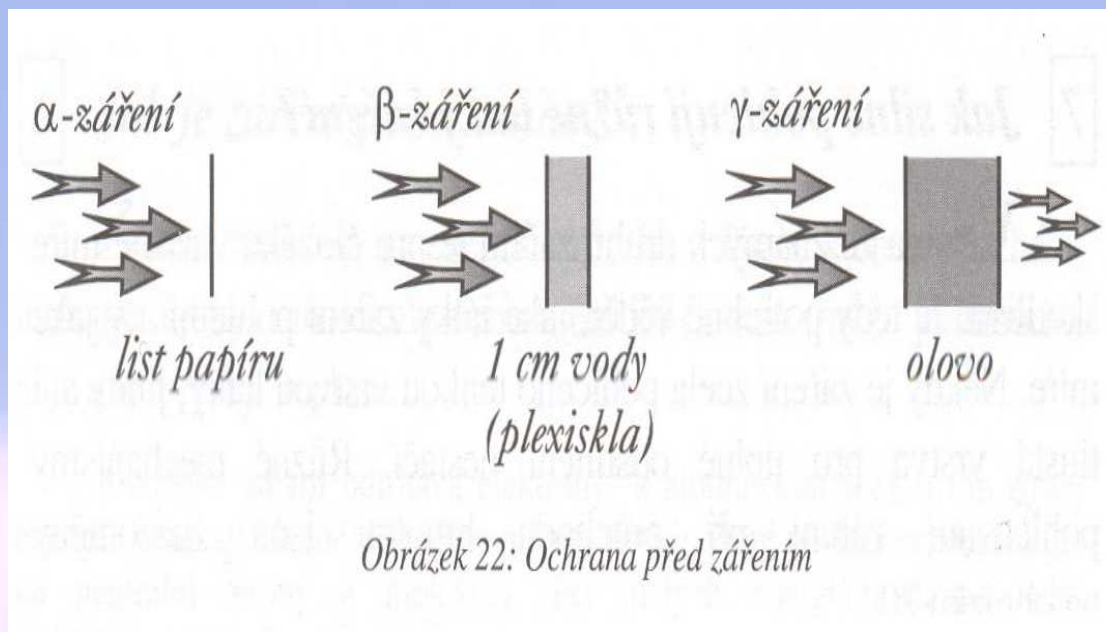
### Nádorové buňky – vyšší mitotická aktivita

Zhoubné nádory je možno léčit především tehdy, pokud jsou na záření citlivější než okolní zdravá tkáň

### Rozdělení nádorů podle citlivosti na záření

1. radiosenzitivní – např. lymfosarkom, lymfogranulom, Ewingův sarkom, retinoblastom, seminom, nefroblastom, meduloblastom
2. částečně citlivé – karcinom kůže, prsu, močového měchýře, dělohy, plic a štítné žlázy
4. se spornou citlivostí – karcinom ledviny, nádory slinné žlázy, konečníku
5. radiorezistentní – ostogenní sarkom, fibrosarkom, maligní melanom

# Absorbce některých typů ionizujícího záření



Tabulka č. 3: Přehled hodnot polovrstev u některých materiálů

Typ materiálu	Polovrstva pro gama záření	Polovrstva pro neutronové záření
Ocel	2 cm	15 cm
Zemina	8 cm	11 cm
Voda	12 cm	6 cm
Polyetylen	25 cm	6 cm

## Ochrana před účinkem ionizujícího záření

### 1. fyzikální ochrana:

- ❖ vzdálenost (odstup), časový faktor
  - snižování intenzity záření se čtvercem vzdálenosti
  - absorpční materiál – olovo, barytový beton, bor, kadmium, parafín, polyetylen – neutrony

### 2. chemická ochrana:

- ❖ snížení množství kyslíku, ochranné látky, snížení metabolismu (chlad)
- ❖ chemické látky zvyšující odolnost vůči ionizujícímu záření – radioprotektiva
- ❖ DRF faktor (dose reduction faktor) – poměr LD 50/30 chráněných zvířat ku LD50/30 zvířat bez ochrany
- ❖ cystein, cysteamin, cystamin, glutation – odstranění volných radikálů

### 3. biologická ochrana: - léčení po ozáření

- ❖ transplantace kostní dřeně
- ❖ podávání vitamínů (A, B, E, K), kyselina linolová, arachidonová)

**Radioprotekce – ochranná opatření snižující účinky ionizujícího záření nebo zvyšující přežívání ozářených jedinců**

# Chemická radioprotekce

- založená na použití **radioprotektivních látek**
  - A) látky s krátkodobým účinkem
  - **radiprotektivní látky obsahující síru** – SH skupina váže kyslíkové radikály, např. cystamin, AET, gamafos – DRF až 2,3
  - **indolylalkylaminy** – způsobují hypoxémii cestou vazokonstrikce (snížení množství kyslíku ve tkáních)
  - **blokátory vápníkového kanálu**
  
  - B) látky s dlouhodobým účinkem
  - **imunomodulátory** - zvýšená produkce cytokinů – lipopolysacharidy, glukán, IL-1, IL -2
  - **inhibitory syntézy prostaglandinů** – zvyšování hematopoetické aktivity kostní dřeně
  - **dextrazoxan** - vychytává kyslíkové radikály
-

# Využití ionizujícího záření v mutačním šlechtění

## Cíl: rozšíření genetické variability

- použití paprsků X, gama (gamapole), neutrony aj.
  - působení na semena, tělo rostliny, pyl
  - nejčastěji se volí dávka LD<sub>50</sub>
  - generace X<sub>0</sub>, X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> → recesivní mutace
  - krátkodobé ozařování x dlouhodobé ozařování
  - Př. **Ječmen jarní** – nepoléhavá odrůda „Diamant“ vznikla vyšlechtěním (ozářením) odrůdy Valtický
-

# Otázky

- Uvedte příklady korpuskulárního a elektromagnetického typu ionizujícího záření
- Charakterizujte přímý a nepřímý účinek záření
- Co je to izotop, uveďte příklady izotopů používaných v biologii
- Vyjmenujte používané jednotky dávky záření
- Co znamenají veličiny LET, RBU ?
- Vyjmenujte jednotlivé typy poškození DNA indukované působením ionizujícího záření
- Co jsou to stochastické a deterministické účinky záření
- Které buněčné populace v lidském těle jsou nejcitlivější k účinkům záření ?
- Vyjmenujte jednotlivé formy nemoci z ozáření a rozsah dávek, které je způsobují
- Definujte veličinu LD<sub>50</sub> a její přibližnou hodnotu u člověka
- Vyjmenujte některé látky zesilující účinky záření a látky s radioprotektivním účinkem
- Vyjmenujte některé typy nádorů indukované ionizujícím zářením