



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ**  
**FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ**

**Radiační ochrana – pojetí a interpretace veličin a  
jednotek v souladu s posledními mezinárodními  
doporučeními**

**doc.Ing. Jozef Sabol, DrSc.**

**Fakulta biomedicínského inženýrství, ČVUT v Praze Nám. Sítná 3105**

**272 01 Kladno**

# Radiační ochrana v medicíně

**Ionizující  
záření**

**Přímo a nepřímo ionizující  
záření**

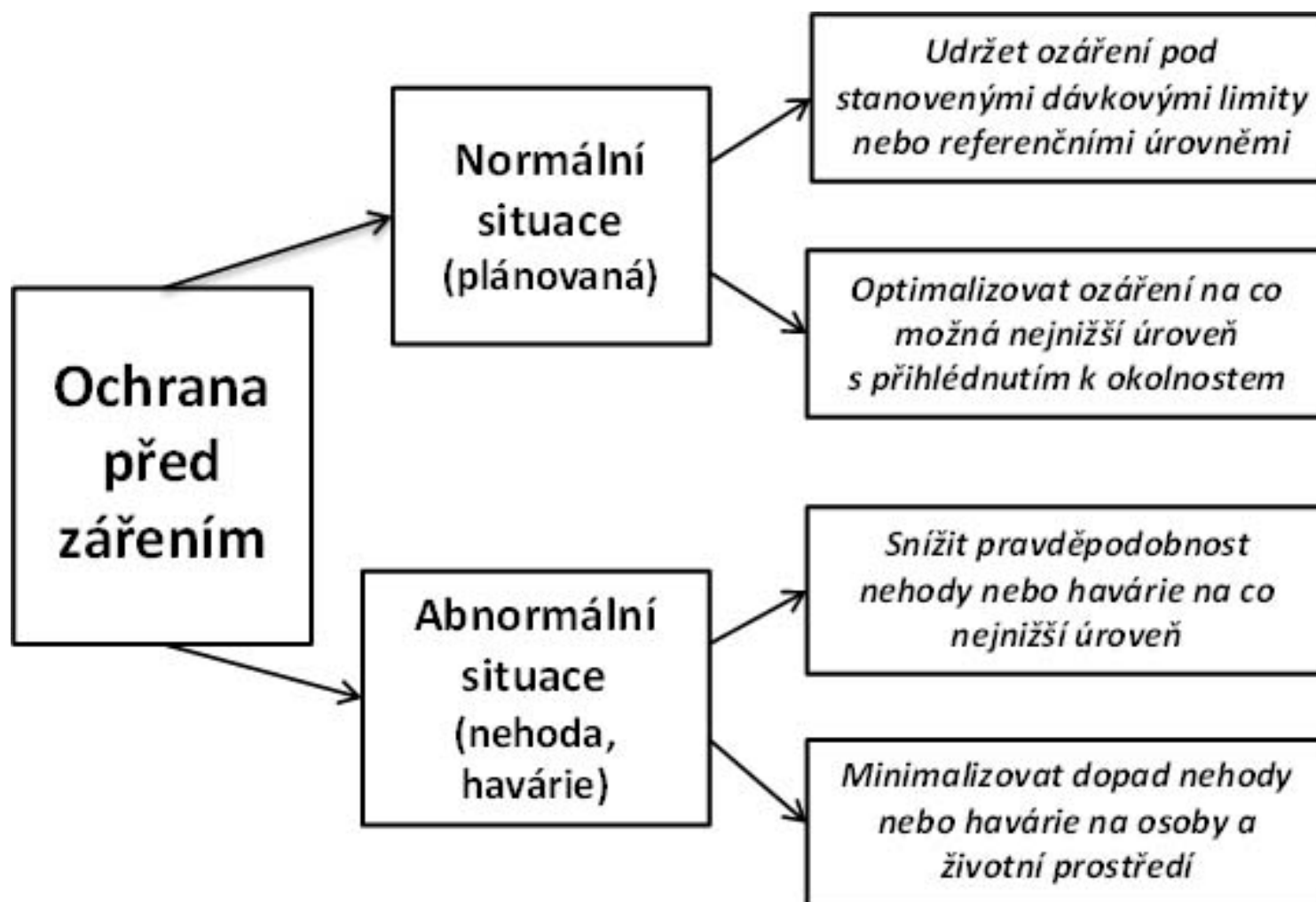
**Adekvátní  
ochrana**

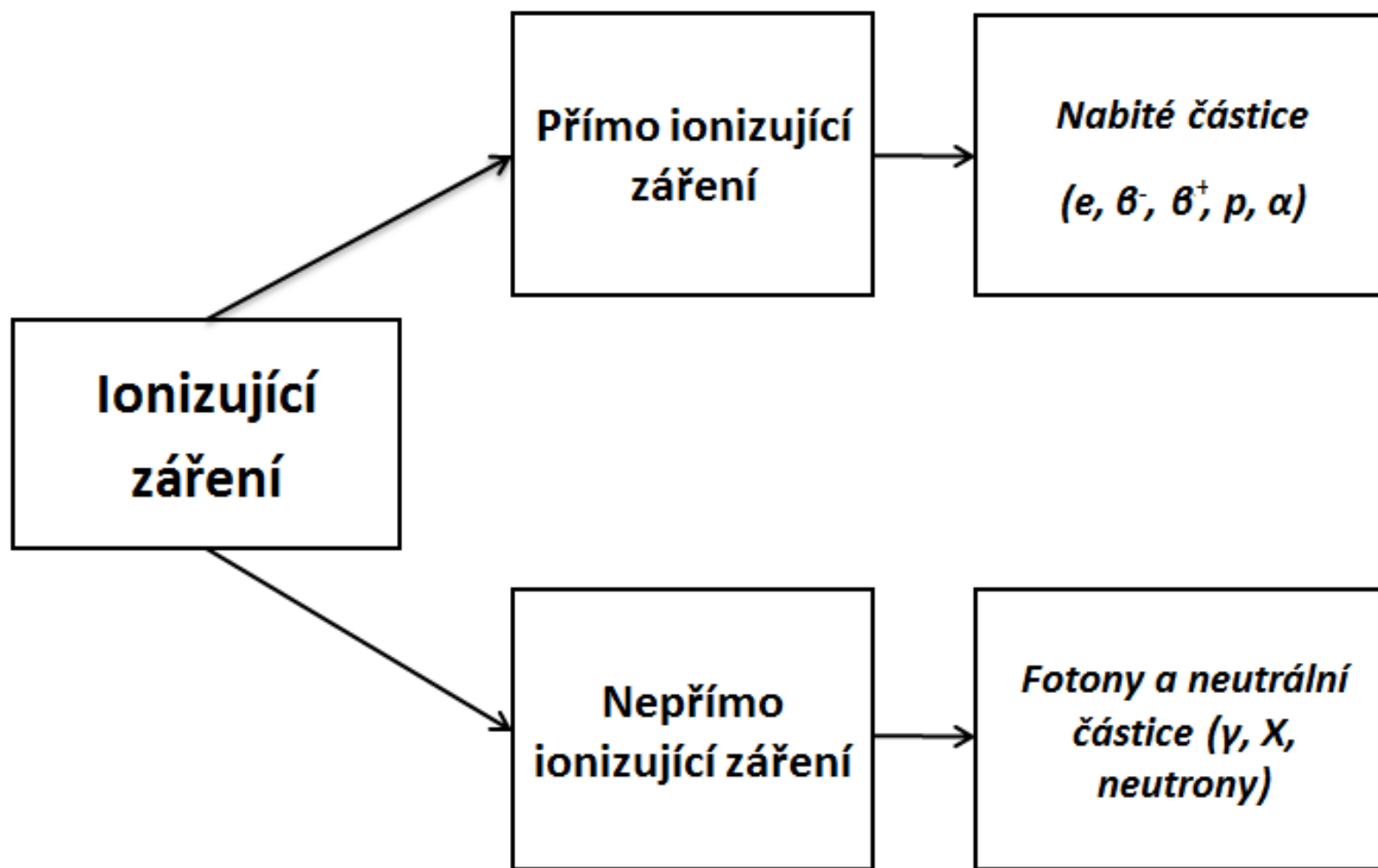
**Normální a abnormální  
situace**

**Záření a  
radionuklid**

**Diagnostická a intervenční  
radiologie, radioterapie a  
nukleární medicína**

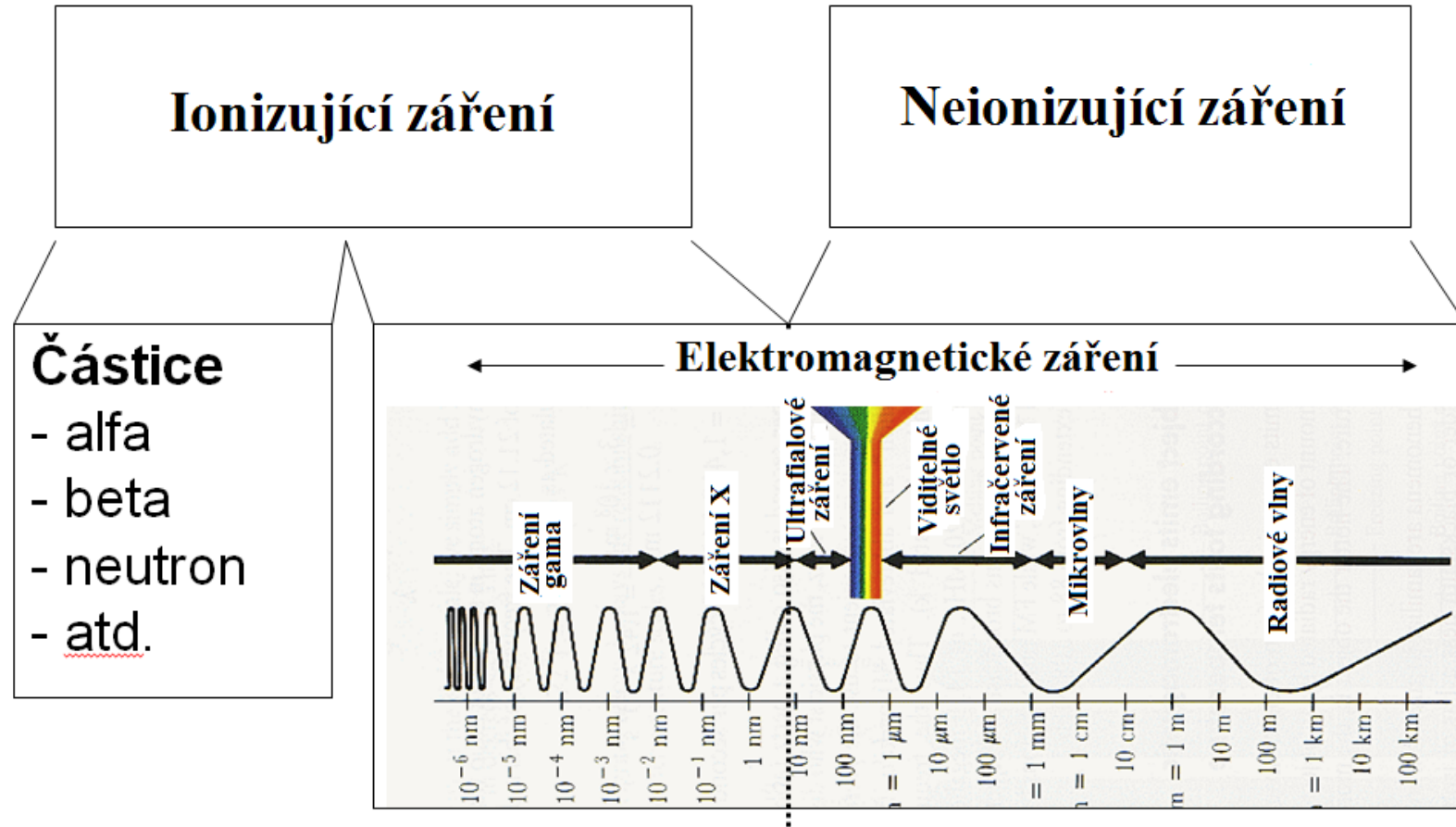
## Cíle radiační ochrany





**Dva druhy ionizujícího záření**

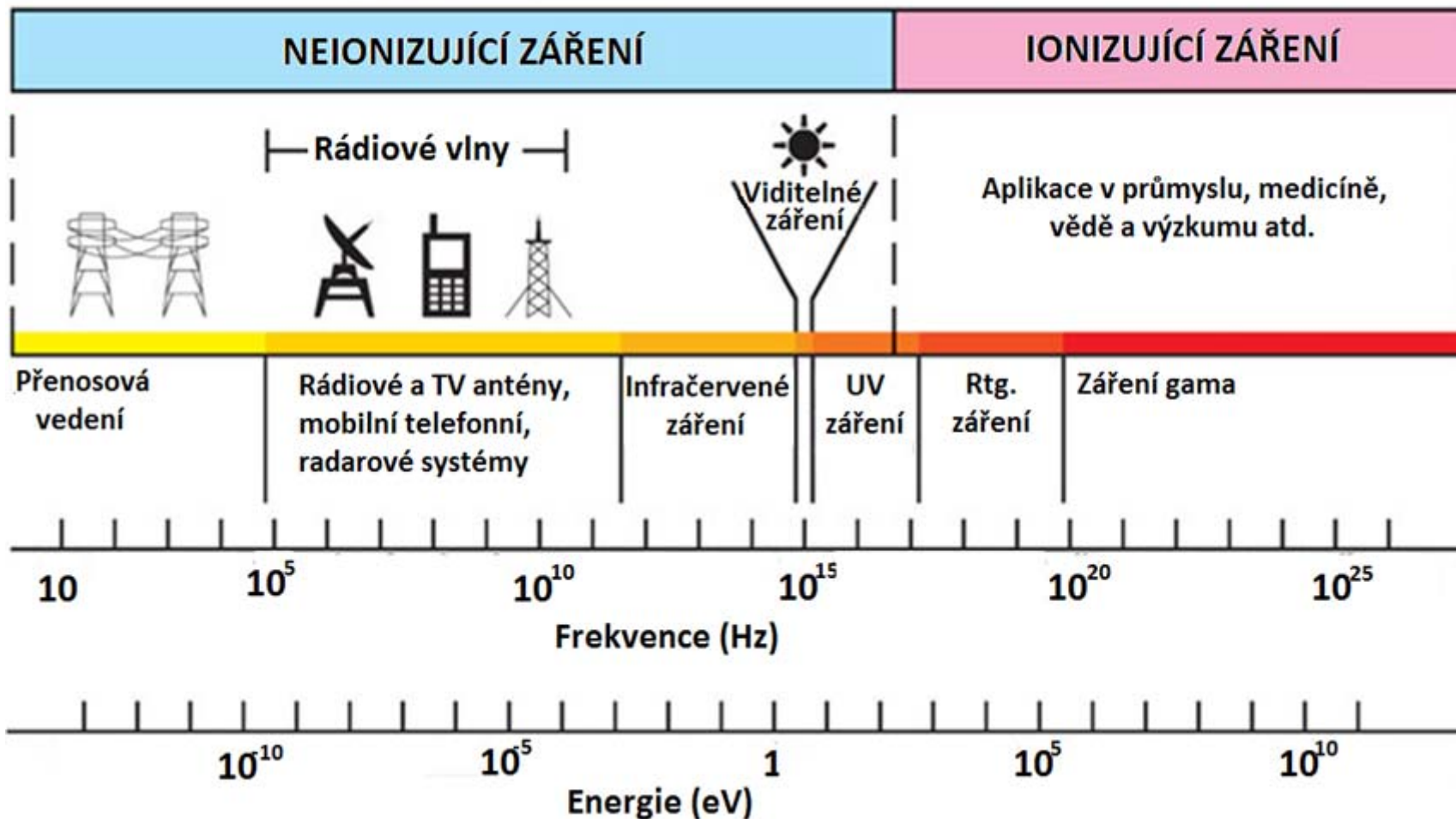
# Ionizující a neionizující záření



Ilustrace vlastností ionizujícího a neionizujícího záření



Výstražné symboly



# Zákonné fyzikální veličiny a jejich jednotky

---

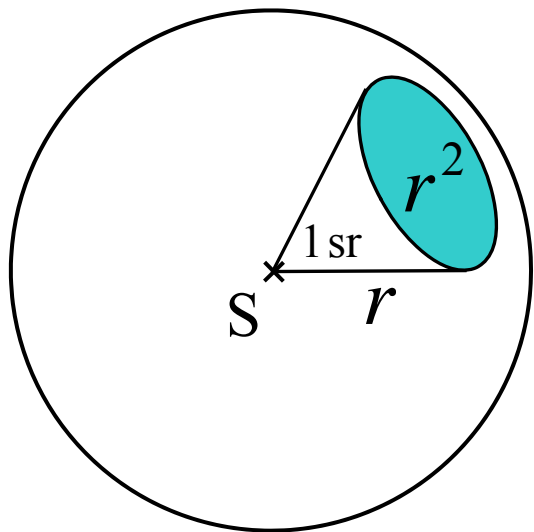
## **Základní** veličiny a jejich jednotky

<i>Název veličiny</i>	<i>Značka</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Značka jednotky</i>
délka	$l$	metr	m
hmotnost	$m$	kilogram	kg
čas	$t$	sekunda	s
elektrický proud	$I$	ampér	A
termodynamická teplota	$T$	kelvin	K
svítivost	$I$	kandela	cd
látkové množství	$n$	mol	mol

# Zákonné fyzikální veličiny a jejich jednotky

## Rovinný a prostorový úhel

<i>Název veličiny</i>	<i>Značka</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Značka jednotky</i>
rovinný úhel	$\alpha, \beta, \gamma$	radián	rad
prostorový úhel	$\Sigma, \Omega, \Pi$	steradián	sr



Steradián je prostorový úhel s vrcholem ve středu kulové plochy, který na této ploše vytíná část o obsahu čtverce se stranou délky poloměru koule.

Steradián je prostorový úhel, který na povrchu koule o poloměru  $r$  vytíná plochu o obsahu  $r^2$ .



# Zákonné fyzikální veličiny a jejich jednotky

---

## Odvozené jednotky fyzikálních veličin

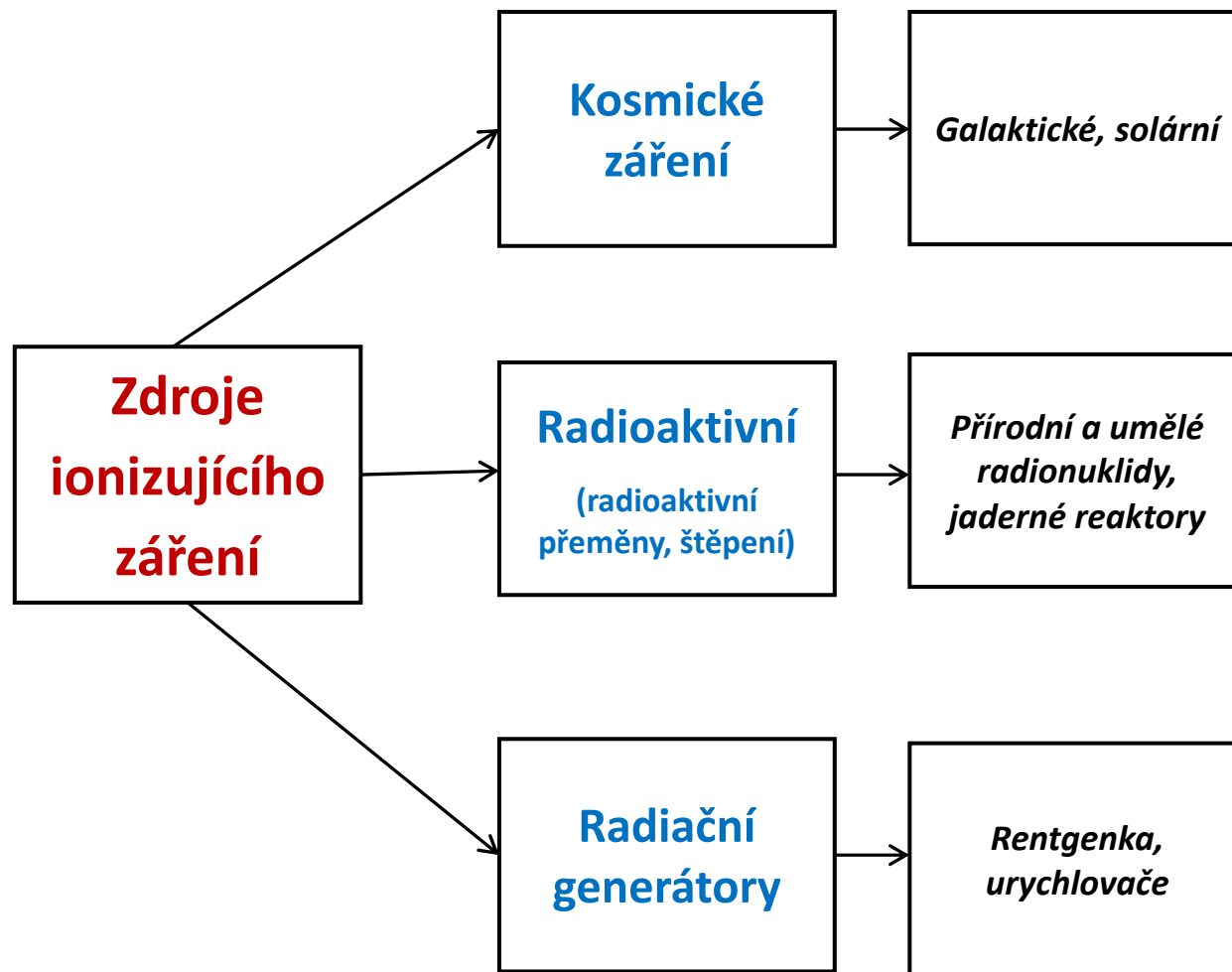
<i>Název veličiny</i>	<i>Značka</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Značka jednotky</i>
obsah	$S$	čtverečný metr	$m^2$
objem	$V$	kubický metr	$m^3$
rychlost	$v$	metr za sekundu	$m \cdot s^{-1}$
síla	$F$	newton	N
tlak	$p$	pascal	Pa
energie	$E$	joule	J
výkon	$P$	watt	W

# Zákonné fyzikální veličiny a jejich jednotky

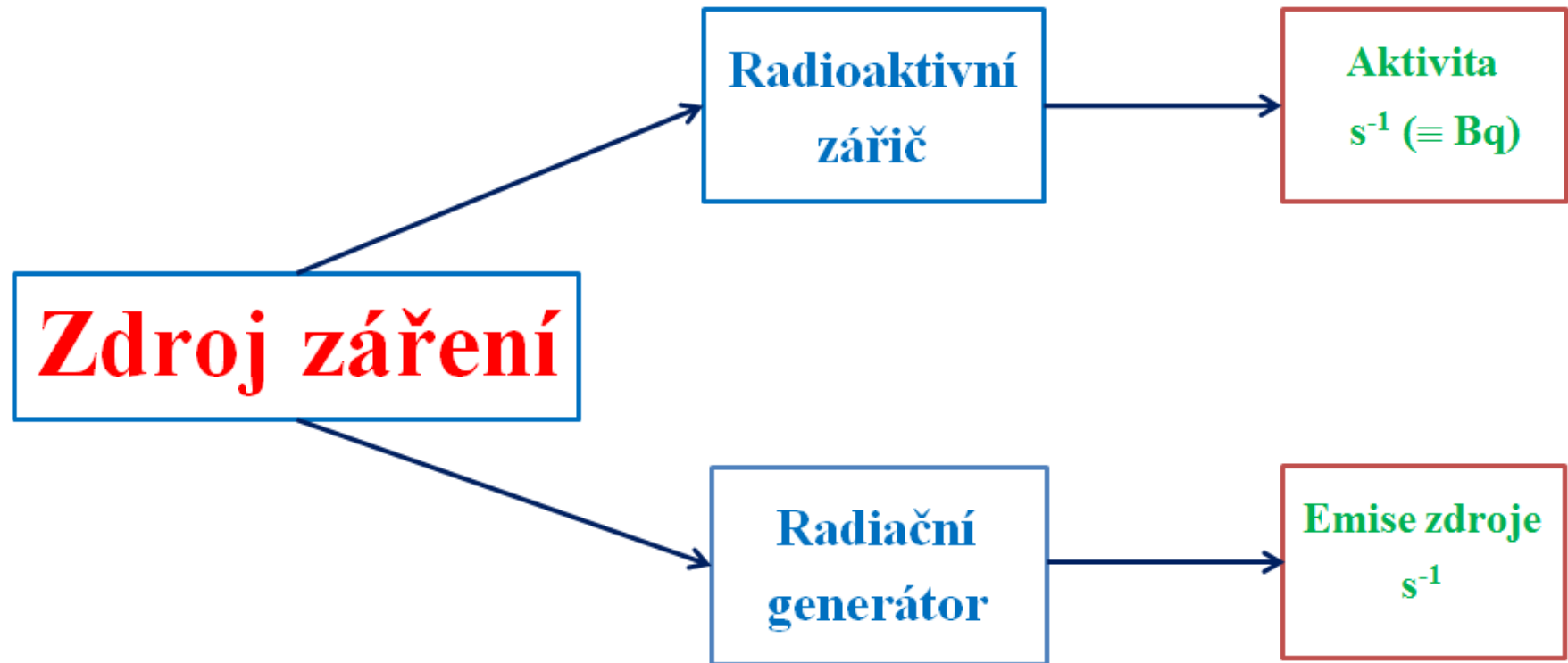
---

## Násobky a díly jednotek fyzikálních veličin

<i>Předpona</i>	<i>Značka</i>	<i>Násobek</i>	
tera	T	1 000 000 000 000	$10^{12}$
giga	G	1 000 000 000	$10^9$
mega	M	1 000 000	$10^6$
kilo	k	1 000	$10^3$
mili	m	0,001	$10^{-3}$
mikro	$\mu$	0,000 001	$10^{-6}$
nano	n	0,000 000 001	$10^{-9}$
piko	p	0,000 000 000 001	$10^{-12}$



**Principiální zdroje ionizujícího záření**



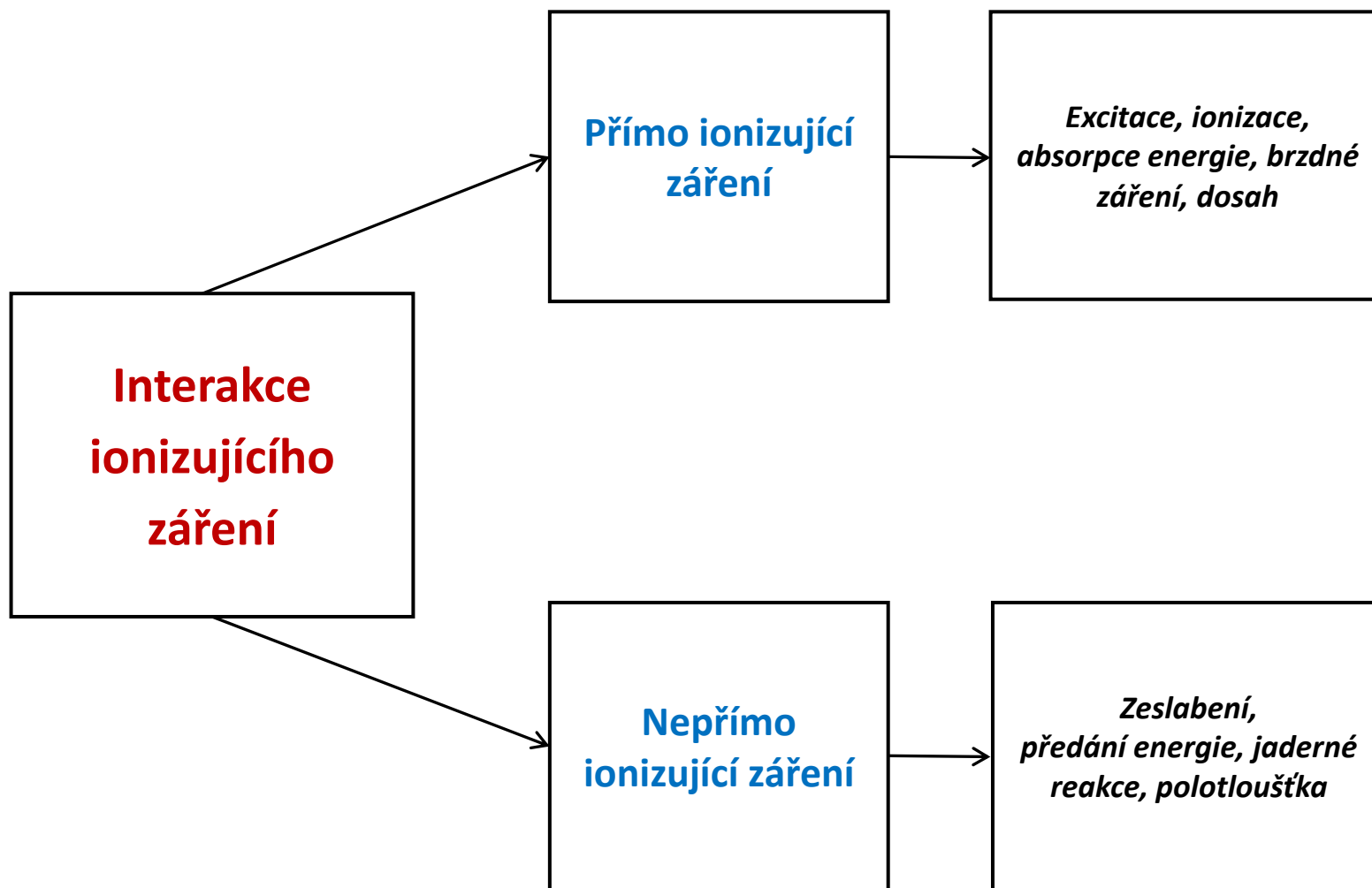
**Pole záření**

**Fluence  
částic**

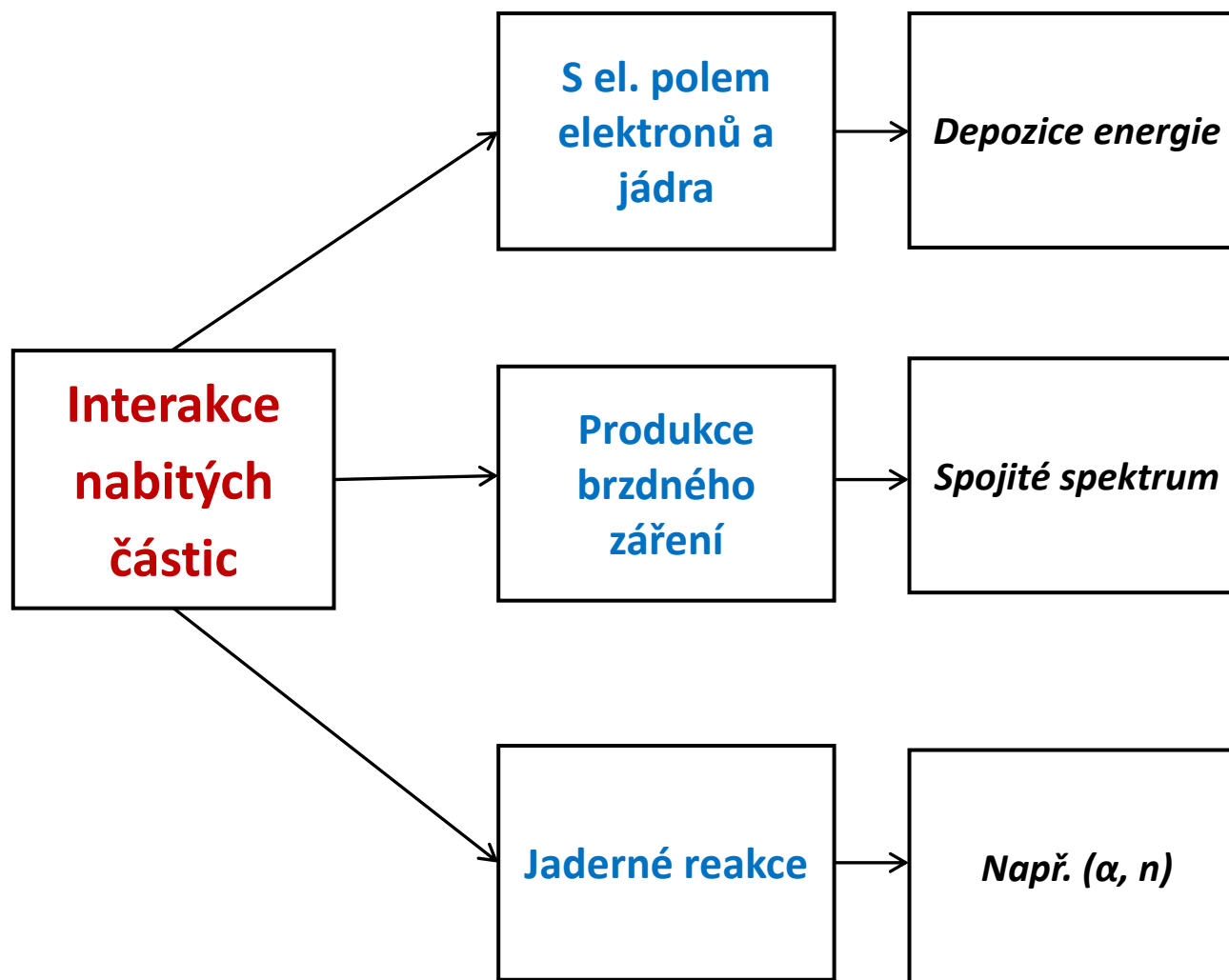
**$m^{-2}$**

**Fluence  
energie**

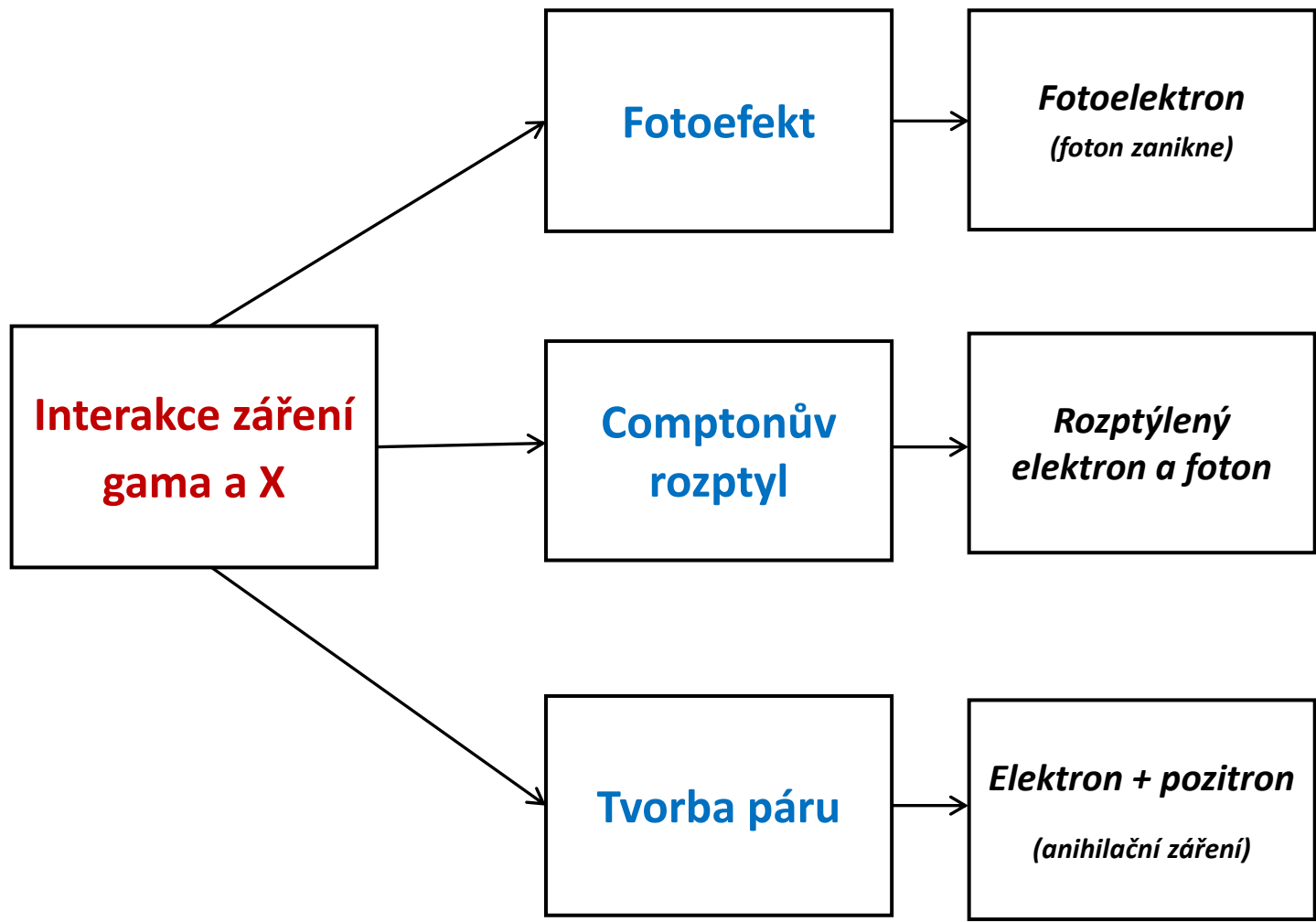
**$J.m^{-2}$**



**Hlavní interakční procesy přímo a nepřímo ionizujícího záření**



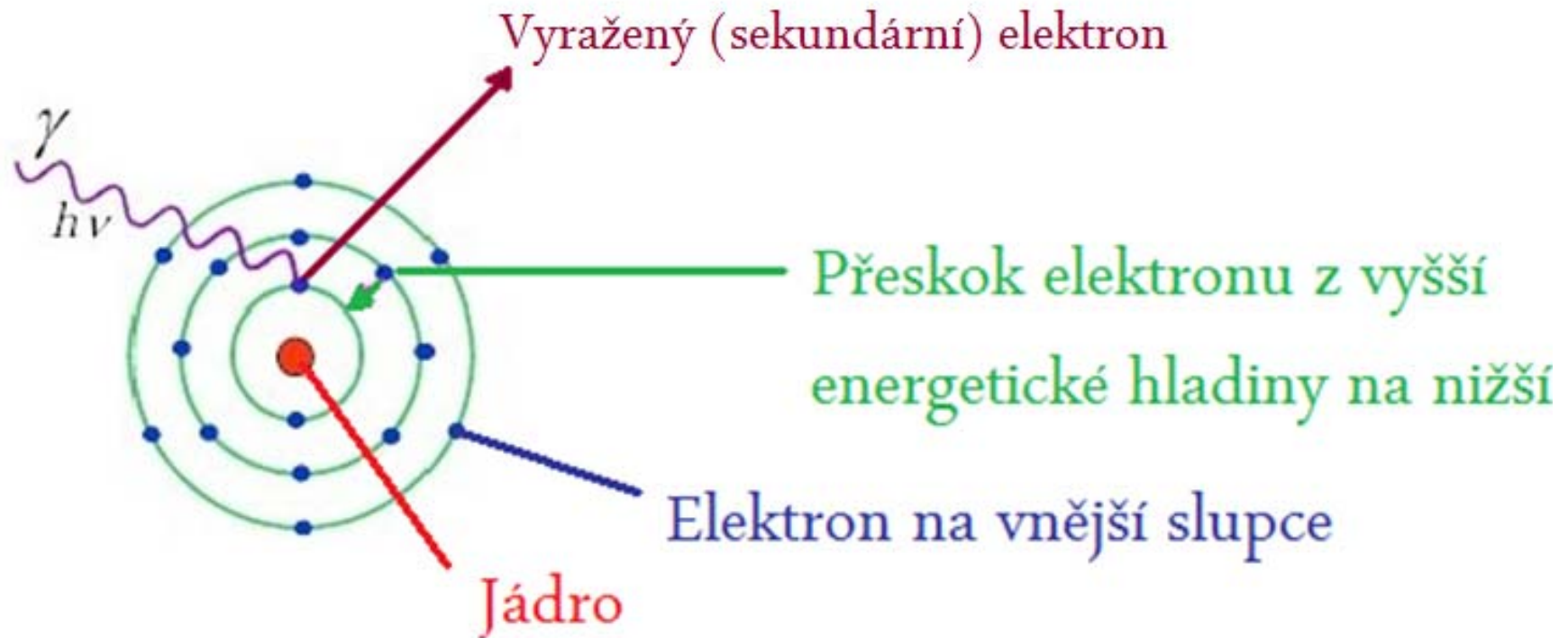
**Stěžejní interakce nabitých částic s látkou**



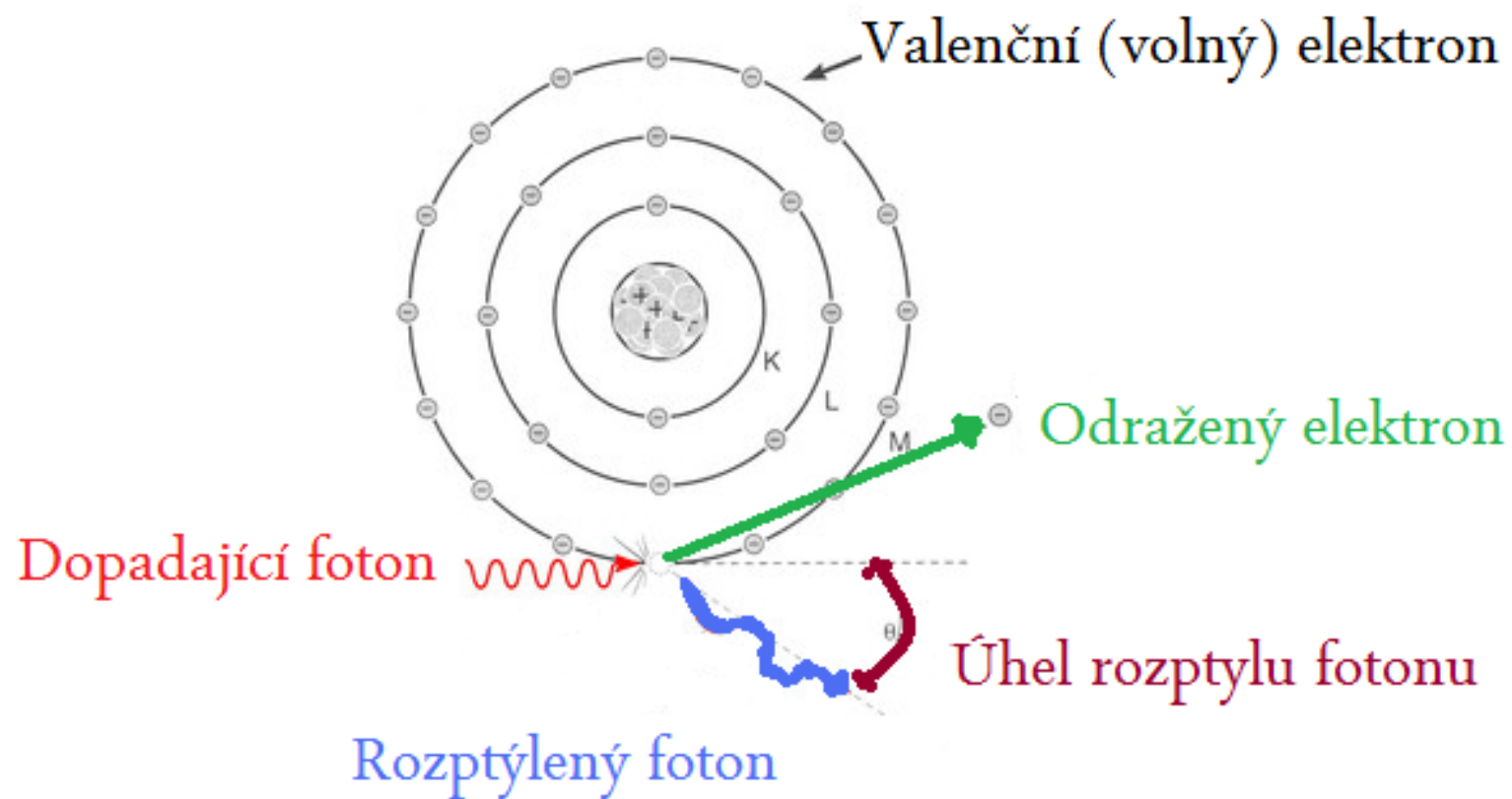
**Nejdůležitější interakce záření gama a X s látkou**



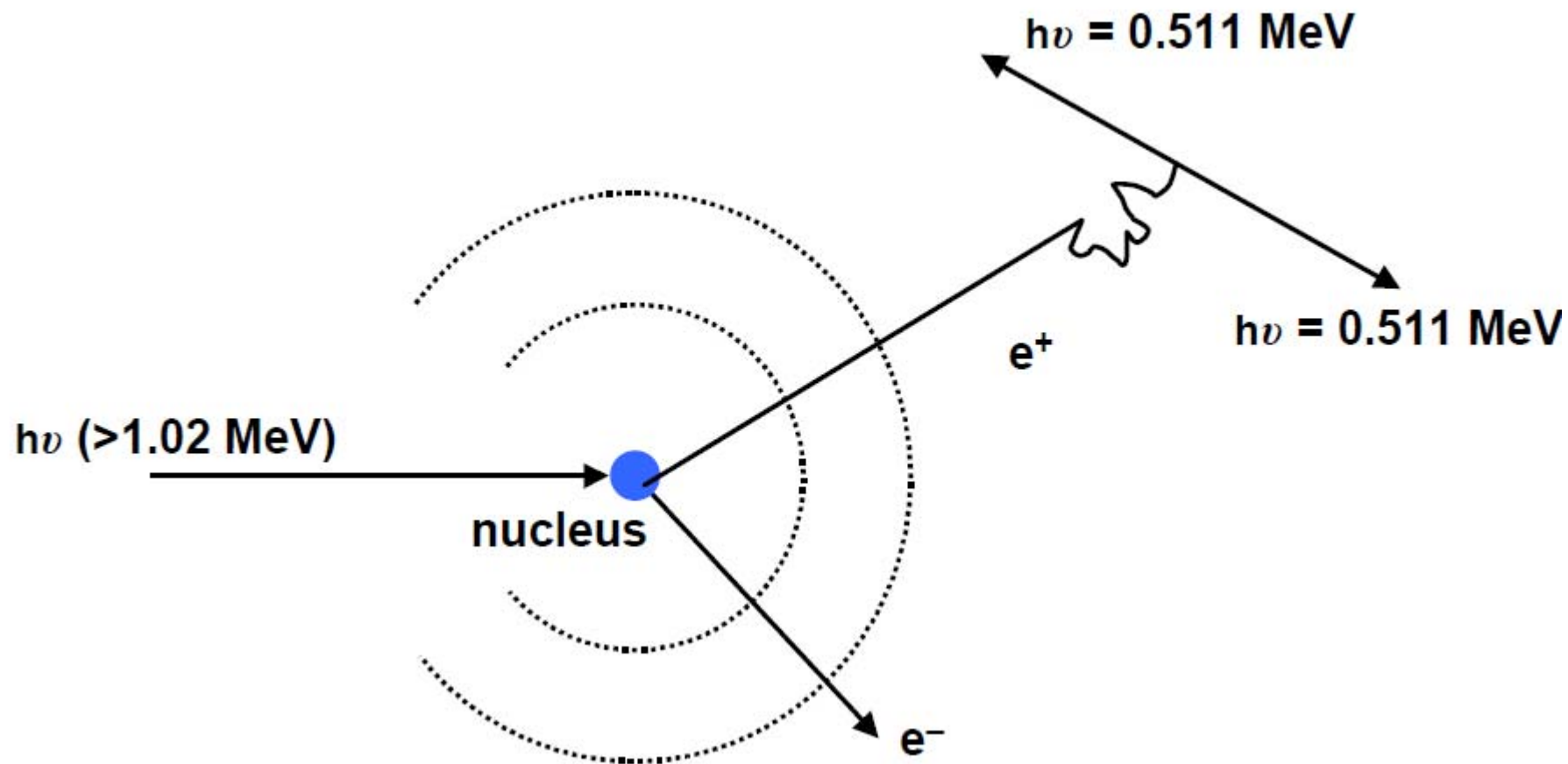
# Princip fotoefektu

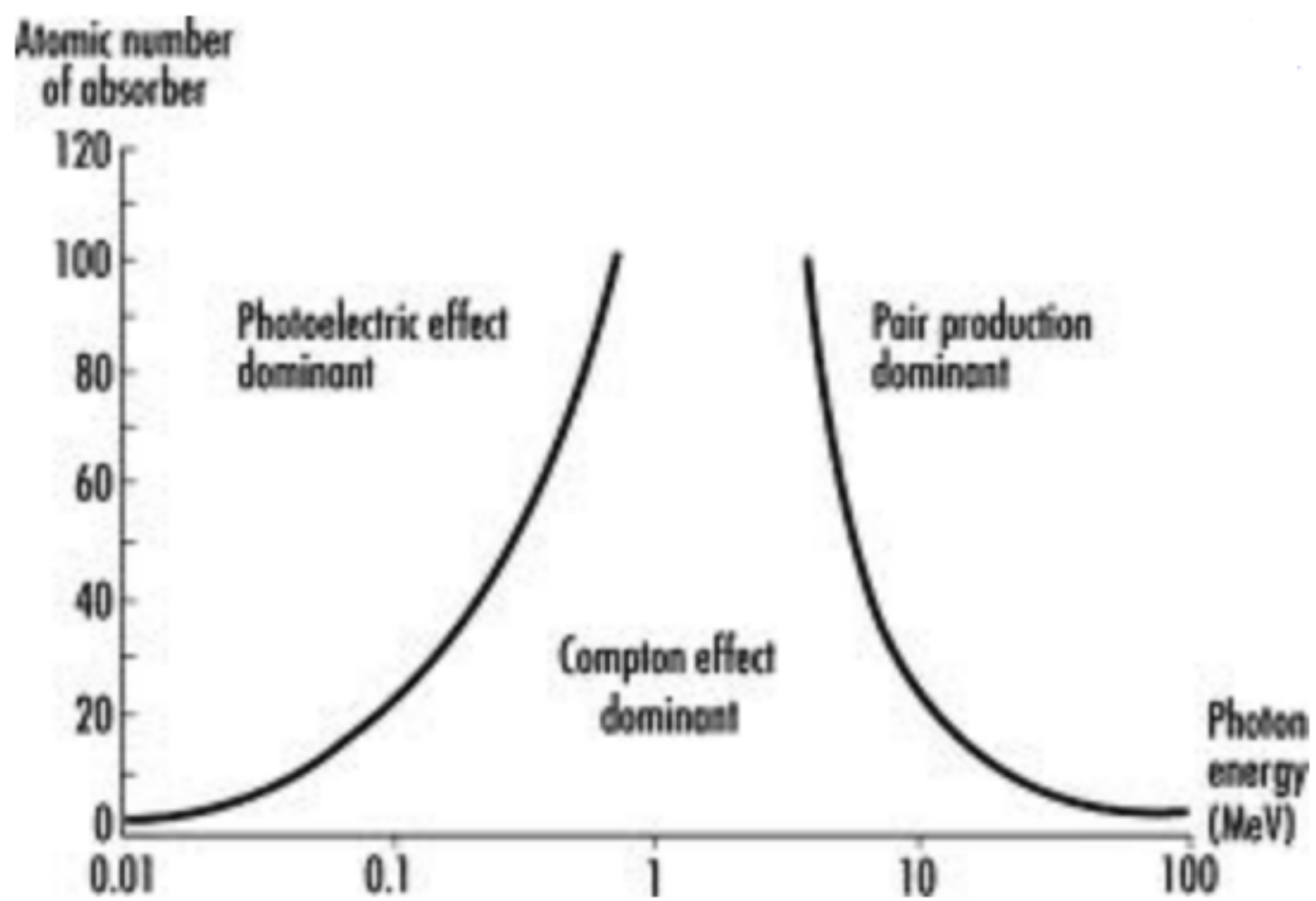


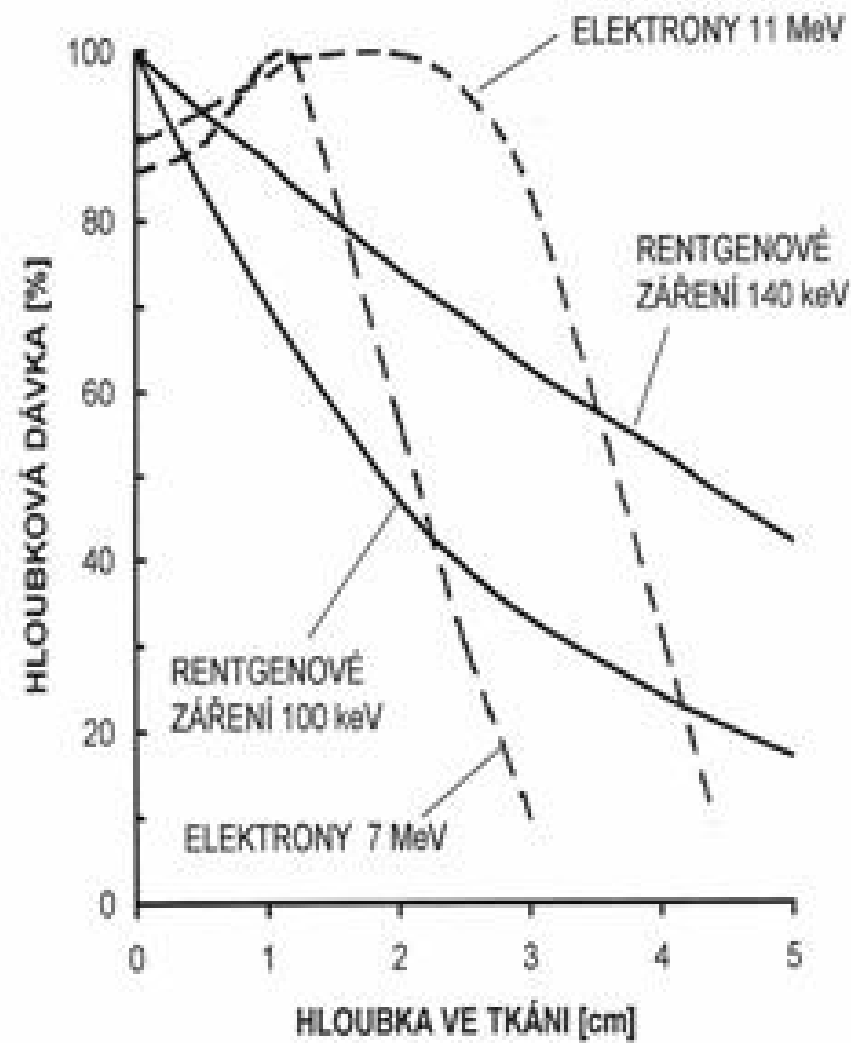
# Princip Comptonova rozptylu

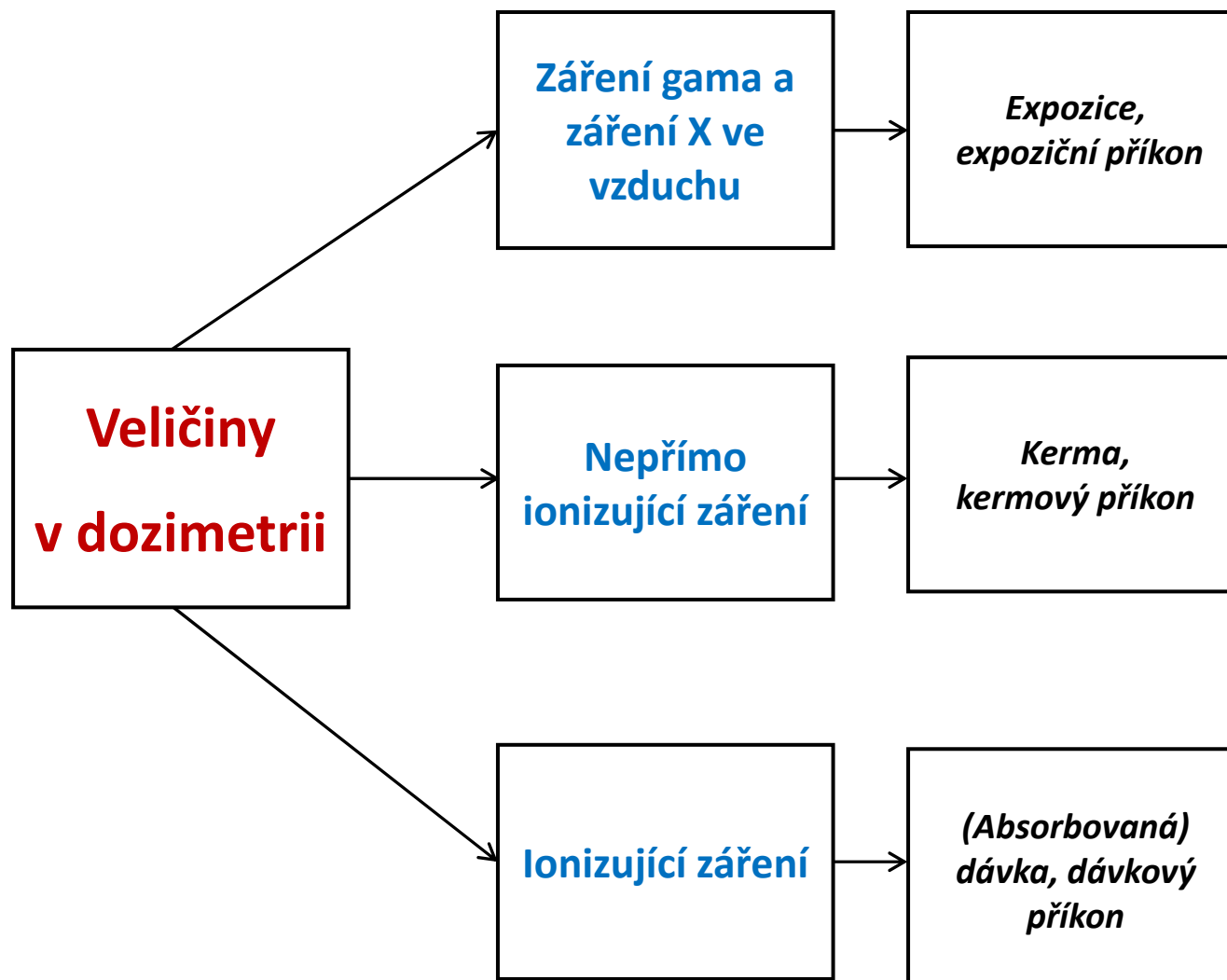


# Tvorba páru









**Veličiny v dozimetrii ionizujícího záření**

# Veličiny a jednotky záření v dozimetrie

Expozice

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

stará jednotka R (rentgen), SI jednotka C.kg<sup>-1</sup>

Expoziční rychlost

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt}$$

stará jednotka R.h<sup>-1</sup> (rentgen za hodinu), SI jednotka A.kg<sup>-1</sup>

# Veličiny a jednotky záření v dozimetrie

Dávka

$$D = \frac{d\bar{\mathcal{E}}}{dm}$$

stará jednotka rad, SI jednotka  $\text{J.kg}^{-1} \equiv \text{Gy}$  (gray)

Dávkový příkon

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

stará jednotka  $\text{rad.h}^{-1}$ , SI jednotka  $\text{Gy.s}^{-1}$ ,  $\text{mGy.h}^{-1}$ ,  $\mu\text{Gy.h}^{-1}$



# Veličiny a jednotky záření v dozimetrie

Kerma

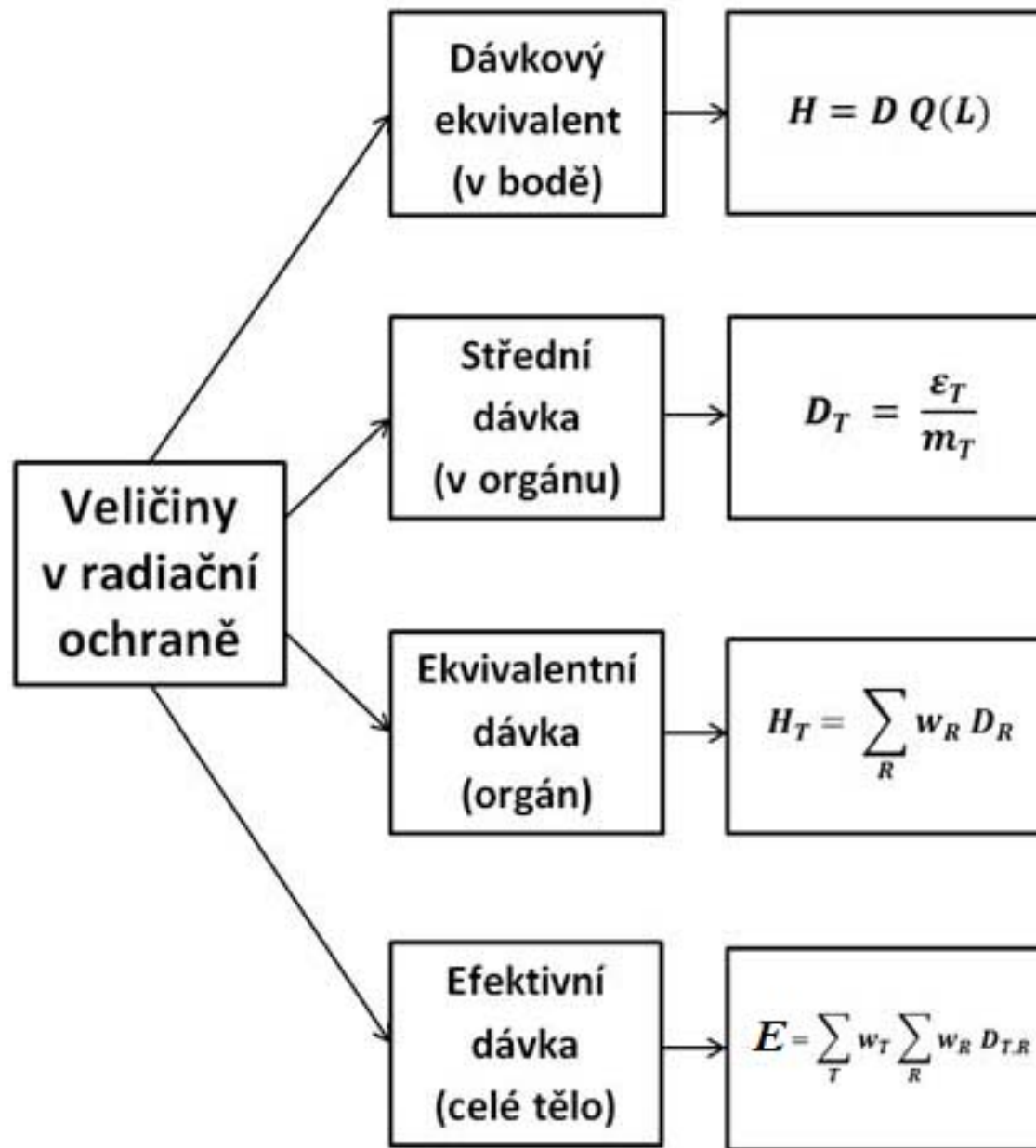
$$K = \frac{dE_{tr}}{dm}$$

stará jednotka rad, SI jednotka  $\text{J.kg}^{-1} \equiv \text{Gy}$  (gray)

Kermový příkon

$$\dot{K} = \frac{dK}{dt}$$

stará jednotka  $\text{rad.h}^{-1}$ , SI jednotka  $\text{Gy.s}^{-1}$ ,  $\text{mGy.h}^{-1}$ ,  $\mu\text{Gy.h}^{-1}$



**Hlavní veličiny v radiační ochraně**

# Veličiny a jednotky záření v radiační ochraně

**Dávkový ekvivalent**

$$H = D \cdot Q_F$$

stará jednotka rem, SI jednotka Sv (sievert)

**Jakostní faktor**

$$Q(L)$$

bezrozměrná veličina

# Veličiny a jednotky záření v radiační ochraně

Orgánová dávka (střední dávka)  $D_T = \frac{\varepsilon_T}{m_T}$

stará jednotka rad, SI jednotka Gy

$$D_T = \int_{m_T} D(m) dm$$

## Ekvivalentní dávka

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

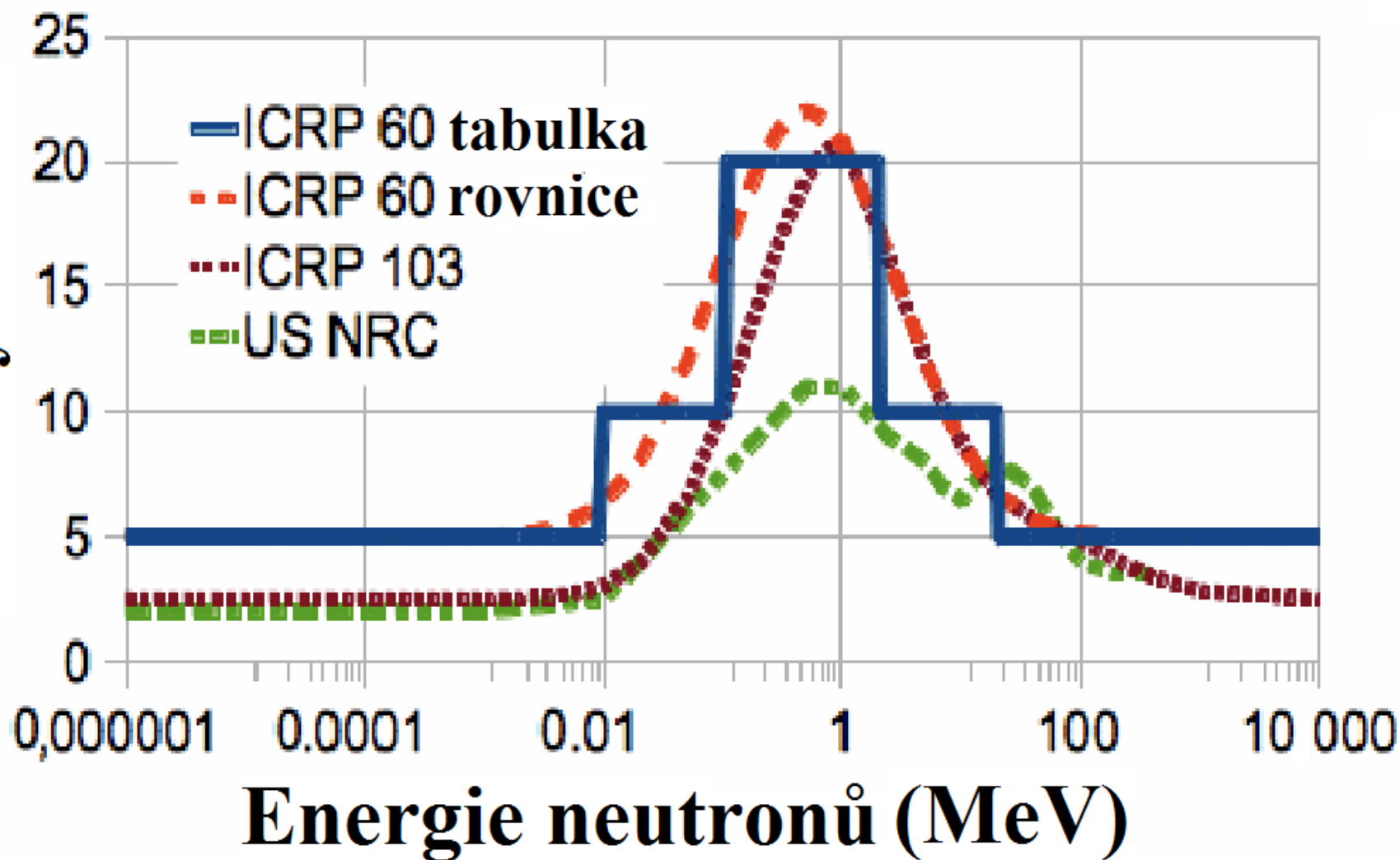
## Efektivní dávka

$$E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

**Radiation weighting factors  $W_R$  (formerly termed Q factor)**  
**used to represent *relative biological effectiveness***  
**according to ICRP report 103**

Radiation	Energy	$W_R$ (formerly Q)
x-rays, gamma rays, beta rays, muons		1
neutrons	< 1 MeV	$2.5 + 18.2 \cdot e^{-[\ln(E)]^2/6}$
	1 MeV - 50 MeV	$5.0 + 17.0 \cdot e^{-[\ln(2 \cdot E)]^2/6}$
	> 50 MeV	$2.5 + 3.25 \cdot e^{-[\ln(0.04 \cdot E)]^2/6}$
protons, charged pions		2
alpha rays, Nuclear fission products, heavy nuclei		20

**Váhový faktor**

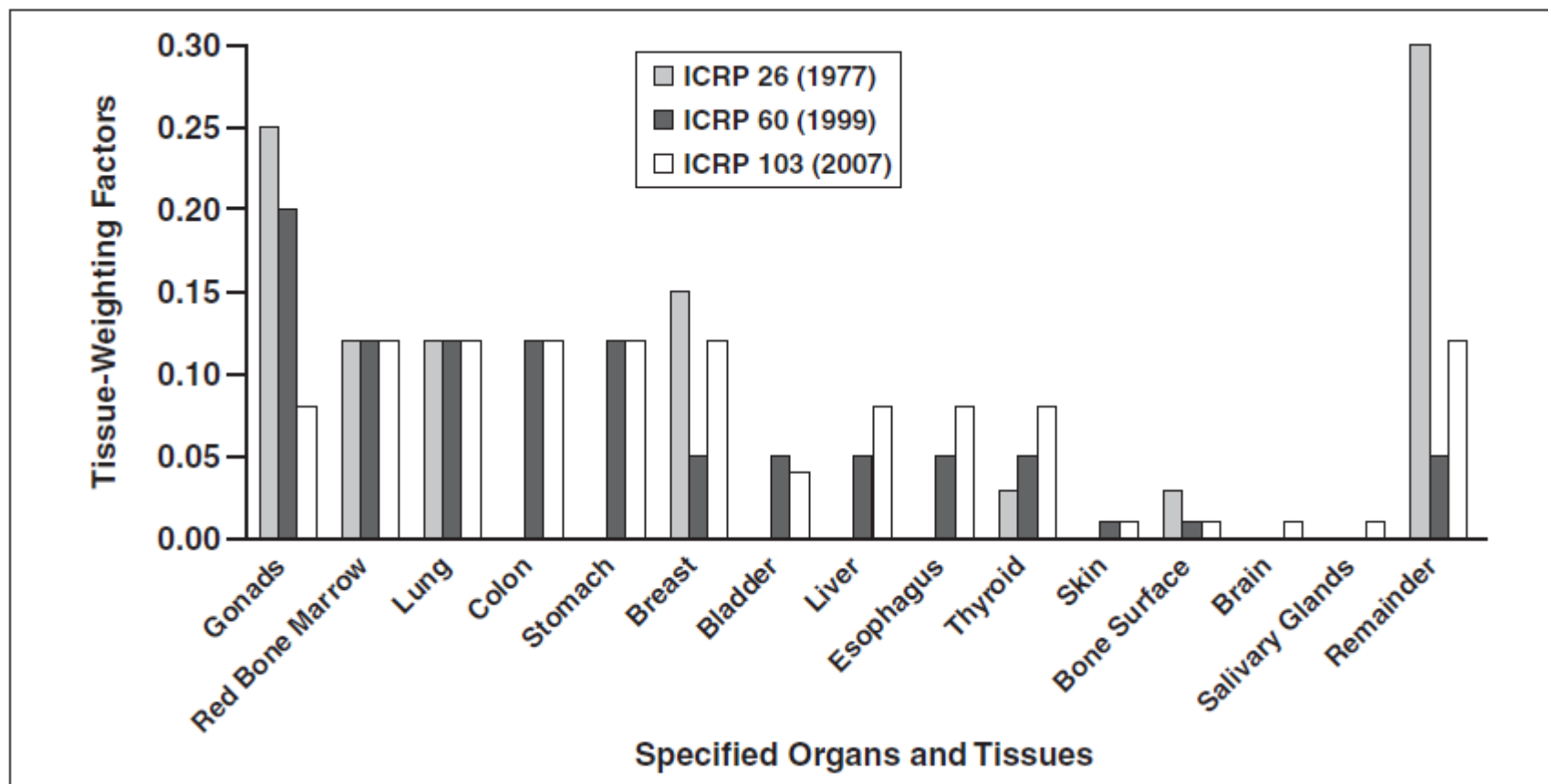


### Tissue-Weighting Factors for ICRP Reports 26, 60, and 103

Tissue or Organ	Tissue-weighting factor		
	ICRP 26	ICRP 60	ICRP 103
Gonads	0.25	0.20	0.08
Red bone marrow	0.12	0.12	0.12
Lung	0.12	0.12	0.12
Colon		0.12	0.12
Stomach		0.12	0.12
Breast	0.15	0.05	0.12
Bladder		0.05	0.04
Liver		0.05	0.04
Esophagus		0.05	0.04
Thyroid	0.03	0.05	0.04
Skin		0.01	0.01
Bone surface	0.03	0.01	0.01
Brain			0.01
Salivary glands			0.01
Remainder	0.30	0.05	0.12
Total	1.00	1.00	1.00



## Tissue-weighting factors specified by ICRP publications 26, 60, and 103



## Vztah mezi ozářením reprezentovaným efektivní dávkou a pravděpodobností indukce zdravotních účinků

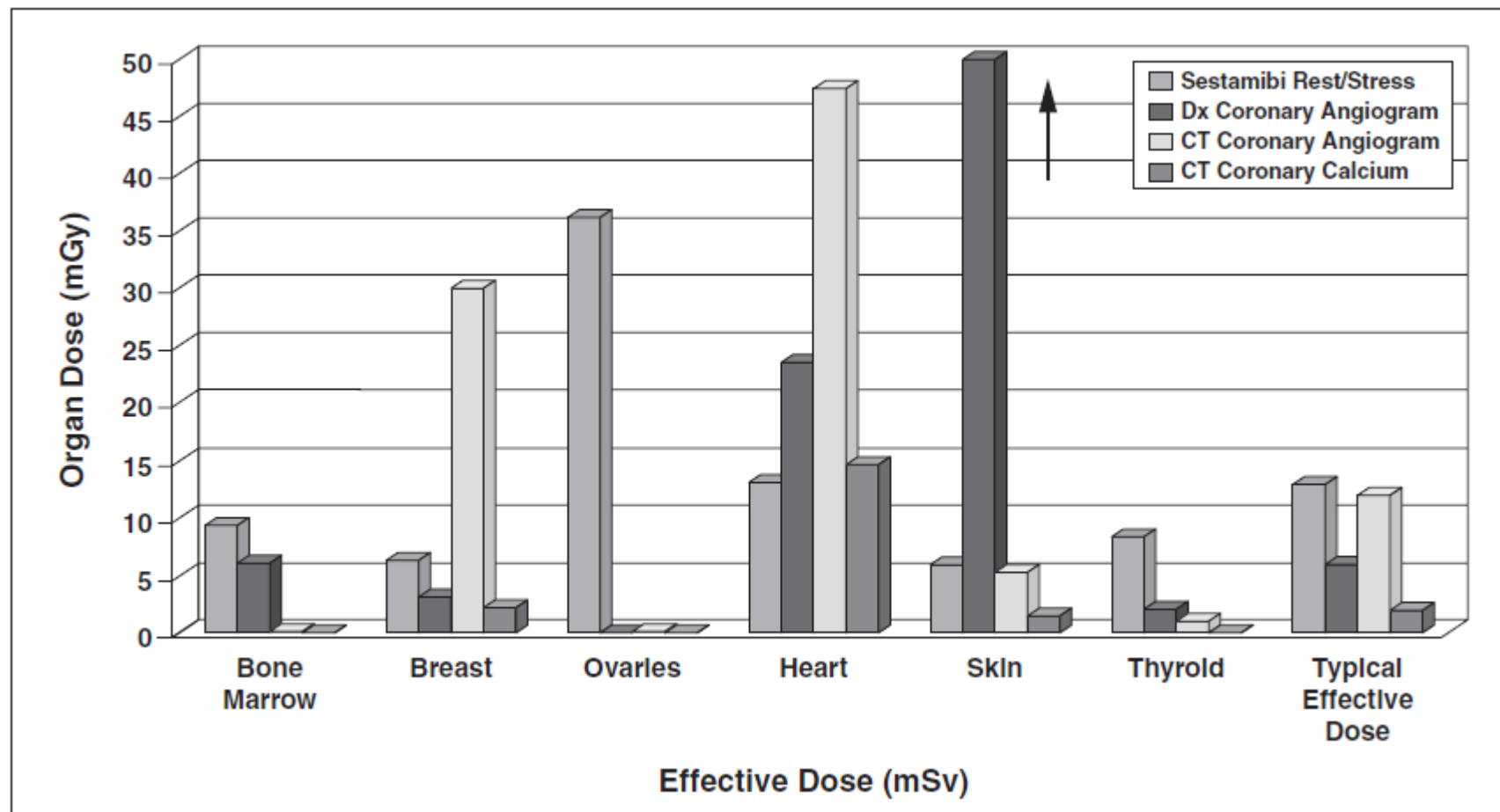
Ozářené  osoby	Nominální koeficient rizika ( $10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ )					
	Rakovina		Dědičné účinky		Celkem	
	ICRP 103	ICRP 60	ICRP 103	ICRP 60	ICRP 103	ICRP 60
Celá populace	5,5	6,0	0,2	1,3	5,7	7,3
Dospělí	4,1	4,8	0,1	0,8	4,2	5,6

### Mean Dose to Various Organs and Effective Dose Based on Organ Dose Estimates<sup>a</sup>

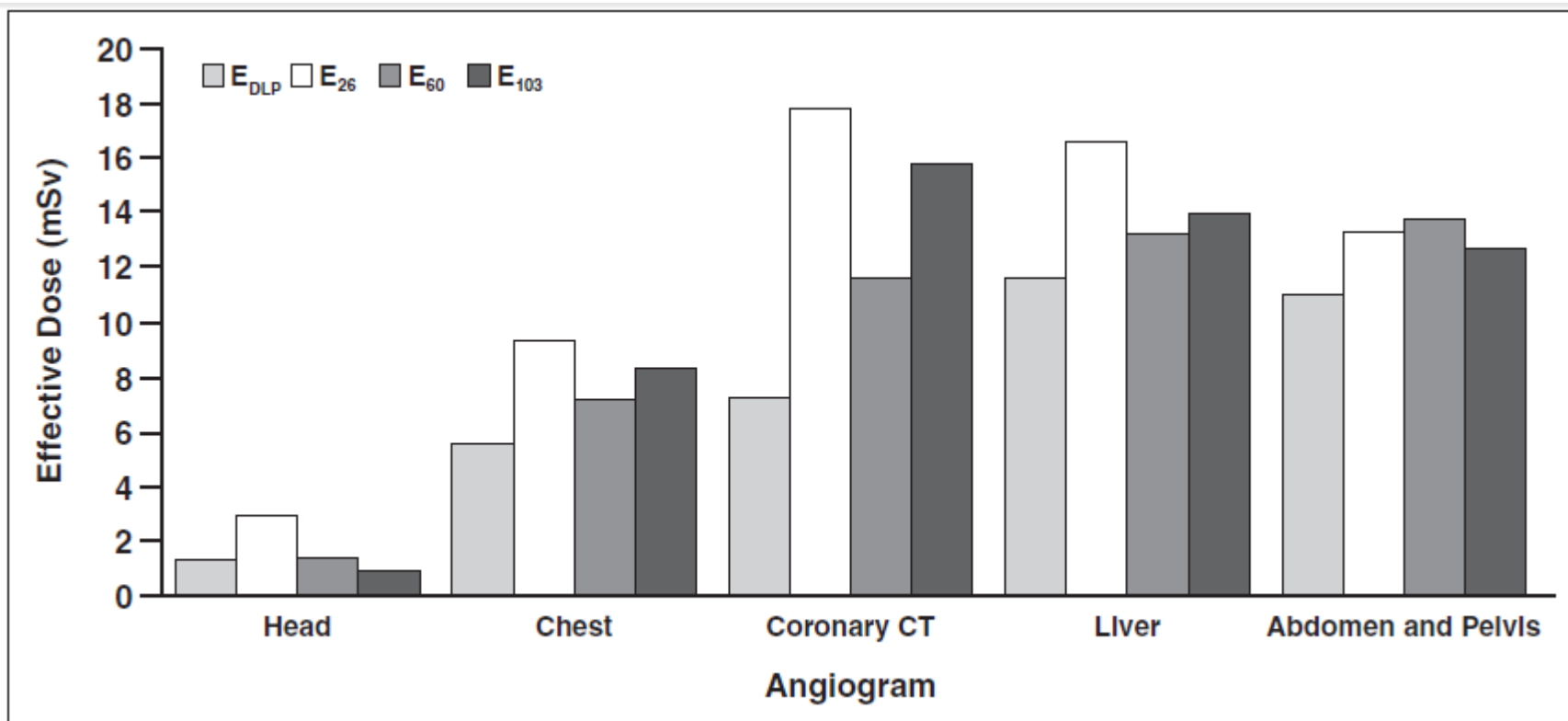
Exam	Organ Dose (mGy)						Effective Dose (mSv)
	Bone Marrow	Breast	Ovaries	Heart	Skin	Thyroid	
Sestamibi rest/stress	9.4	6.4	15.4	13.1	6.0	8.5	13
Diagnostic coronary angiogram	6.1	3.2	0.1	23.7	450.0	2.2	6
CT coronary angiogram	0.1	30.0	0.1	47.3	5.3	1.1	12
CT coronary calcium	0.0	2.1	0.0	14.7	1.6	0.3	2

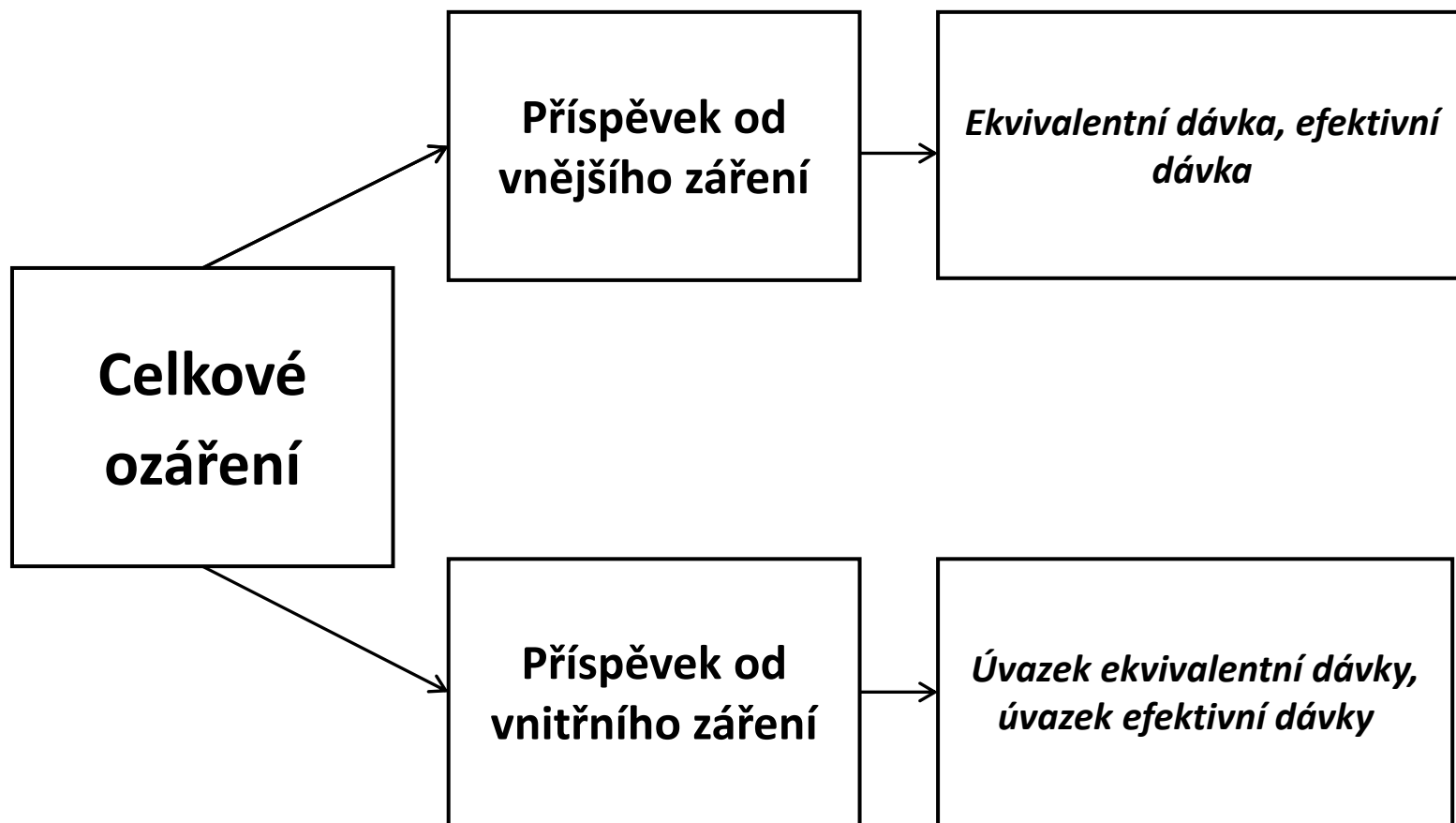
<sup>a</sup>Estimates are for nuclear medicine; coronary catheterization and CT cardiac examinations; and a generic, anthropomorphic model of a “standard” (relatively thin) individual. Note the highly variable distribution of dose to any one organ or tissue, even though the effective dose values are of similar magnitude.

Estimates of organ dose and effective dose for nuclear medicine myocardial perfusion study (sestamibi rest/stress), invasive diagnostic coronary angiogram, CT coronary angiogram, and CT coronary artery calcium scoring examination.

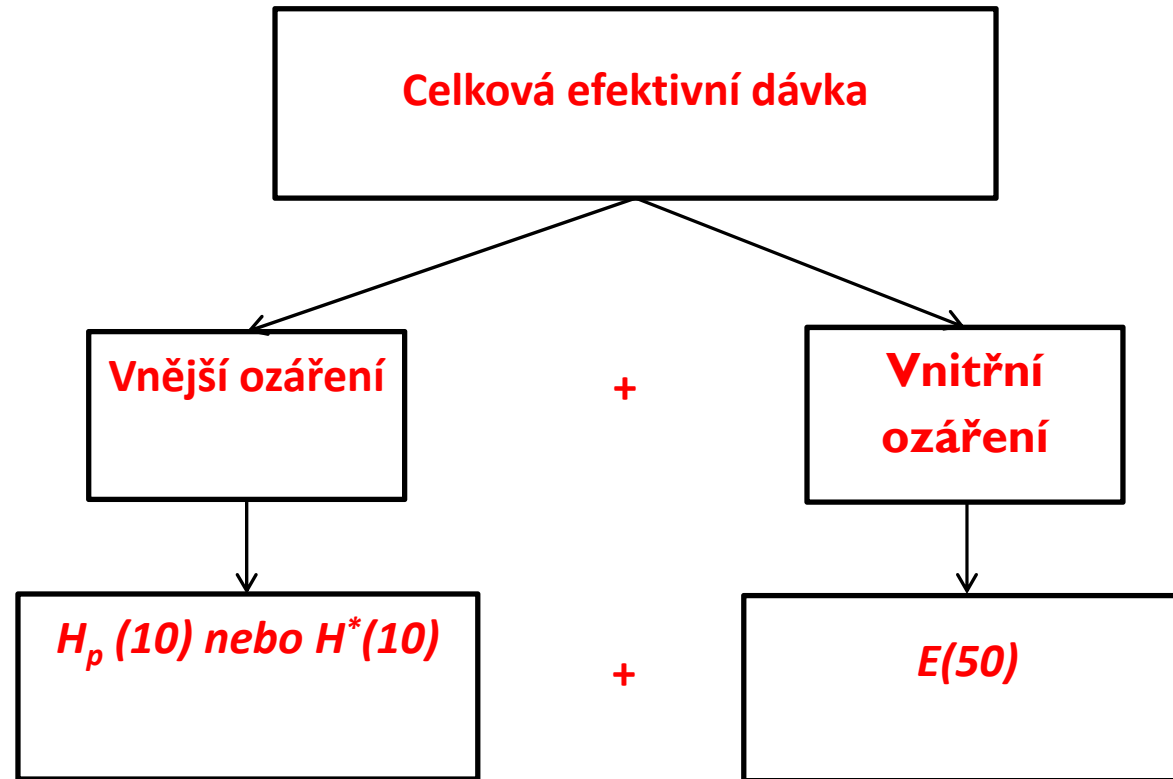


Estimates of effective dose for five common CT examinations calculated using estimated organ doses and organ/tissue weighting factors from ICRP publications 26 [4], 60 [5], or 103 [6] ( $E_{26}$ ,  $E_{60}$ , and  $E_{103}$ ) or calculated using appropriate  $k$  coefficient and DLP.



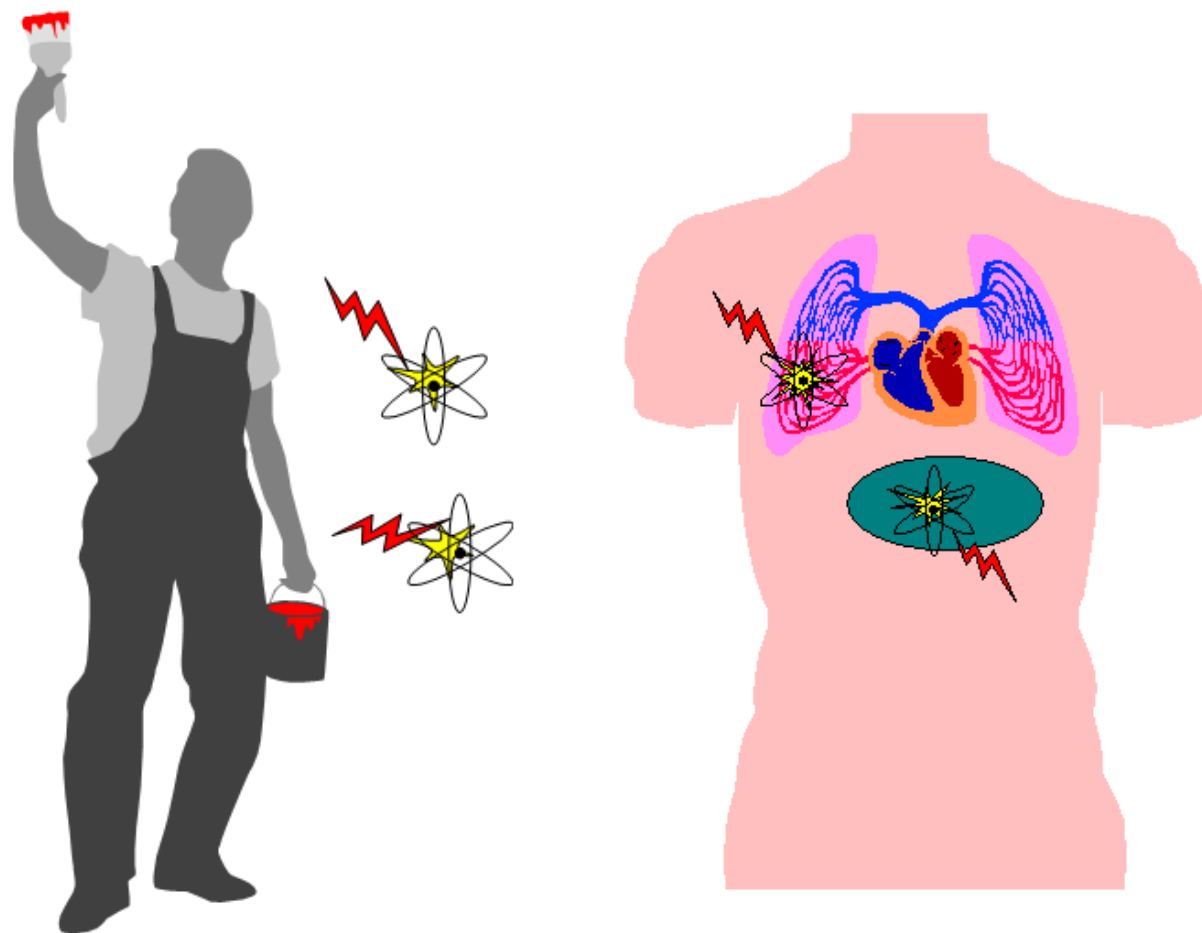


**Vyjádření celkového ozáření a jeho příspěvků**



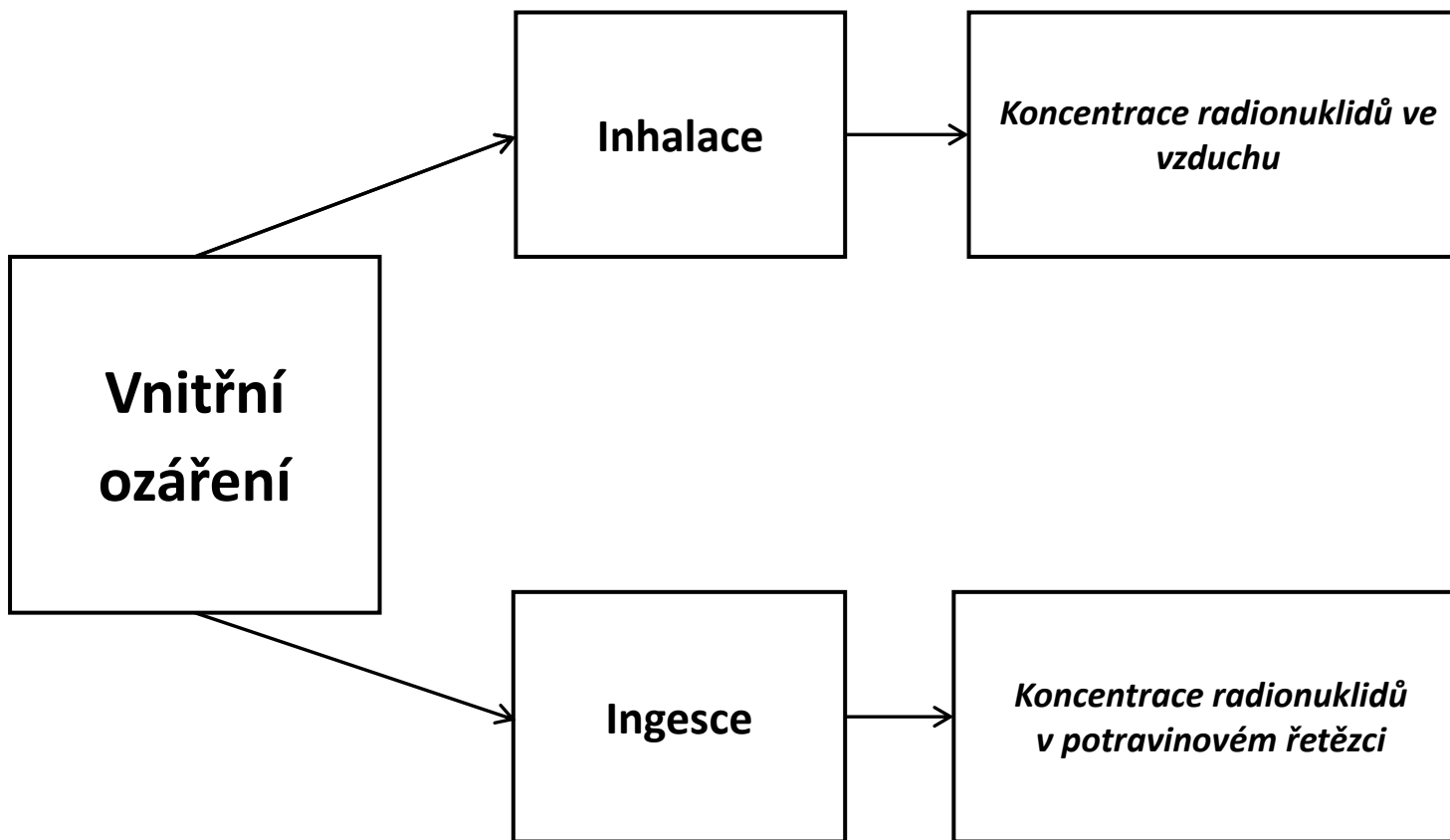
$$E(50) = \sum e_{j,inh}(50) \cdot I_{j,inh} + \sum e_{j,ing}(50) \cdot I_{j,ing}$$

Stanovení celkové efektivní dávky na základě měření operačních veličin a aktivity příjmů radionuklidů inhalací a ingescí

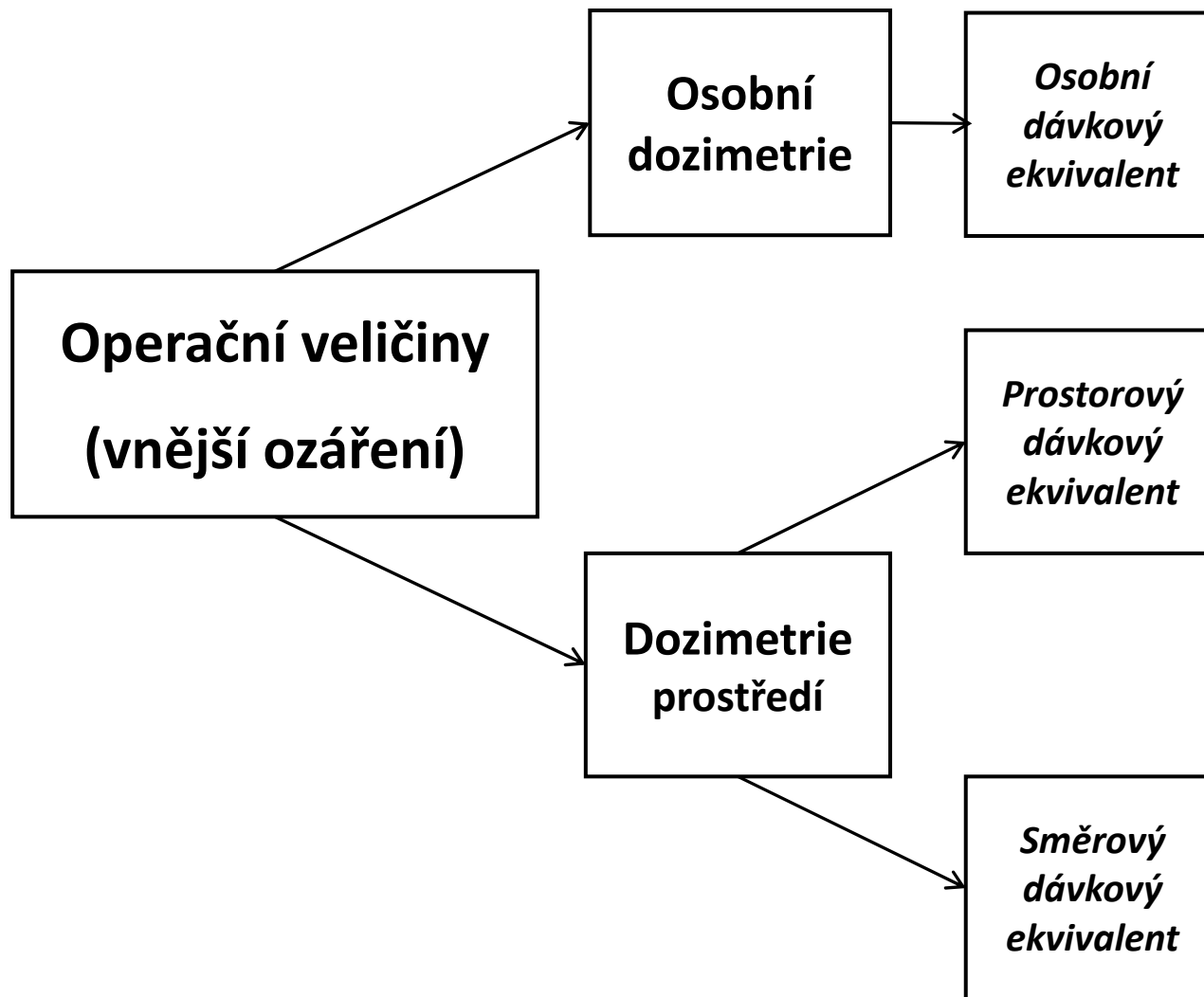


**Vnější vs. vnitřní ozáření**

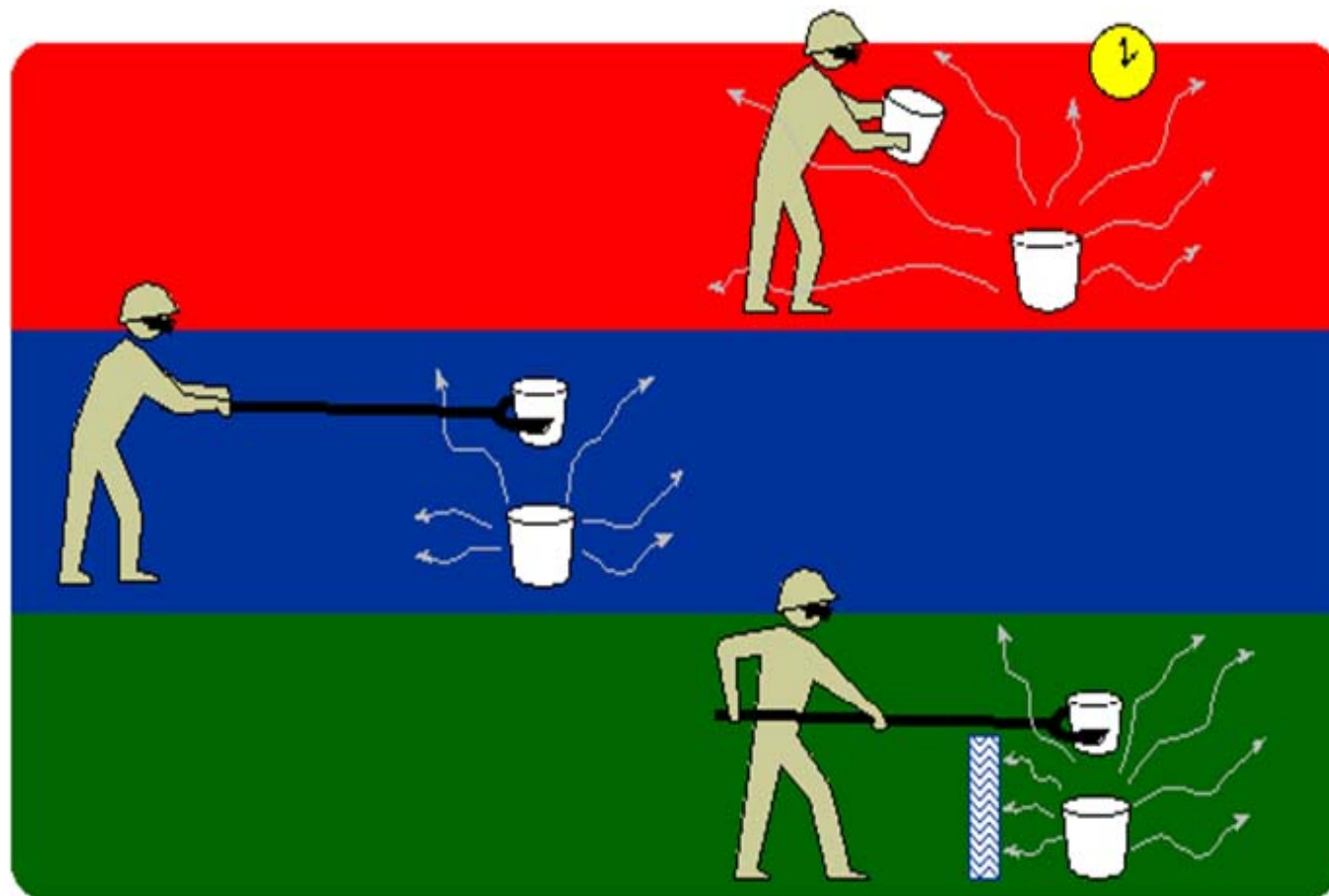




**Kvantifikace vnitřního ozáření**



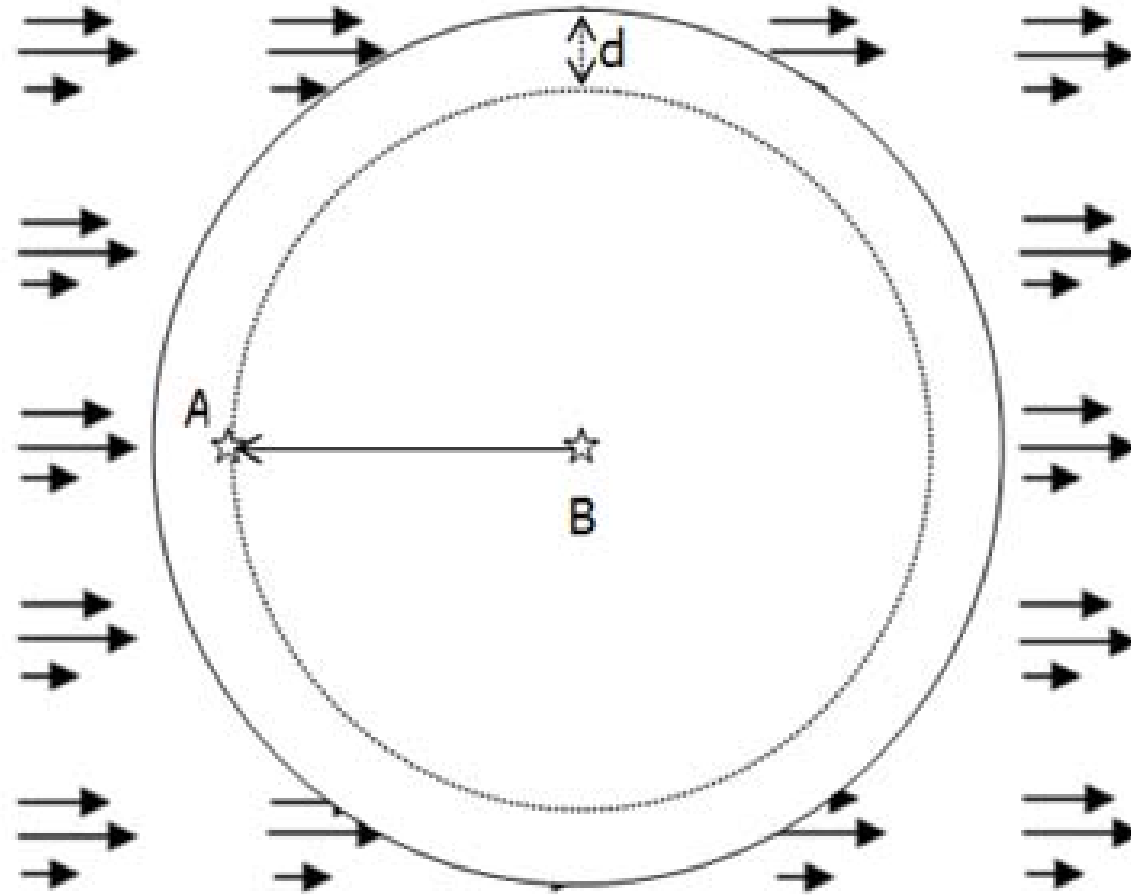
**Operační veličiny pro ocenění vnějšího ozáření**



**Ochrana před vnějším ozářením pomocí vzdálenosti,  
času a stínění**

Úkol	Aplikace operační veličiny	
	Monitorování pracoviště (prostředí)	Monitorování osob
Kontrola efektivní dávky	Prostorový dávkový ekvivalent $H^*(10)$	Osobní dávkový ekvivalent $H_p(10)$
Kontrola dávky na kůži, ruce, nohy a oční čočku	Směrový dávkový ekvivalent $H'(0,07;\Omega)$	Osobní dávkový ekvivalent $H_p(0,07)$

**Aplikace operačních veličin pro monitorování vnějšího ozáření**



Znázornění rozšířeného a usměrněného pole, do něhož je vložen ICRU sférický fantom (koule o průměru 30 cm tvořená tkáňově ekvivalentní látkou). Stanoví se dávkový ekvivalent v bodě A, který leží na poloměru proti směru pole v hloubce  $d$  pod povrchem koule. Číselná hodnota tohoto dávkového ekvivalentu v mSv odpovídá potom hodnotě prostorového dávkového ekvivalentu v referenčním bodě B

Absorbovaná dávka,  $D$

Dávkové veličiny (veličiny  
radiační ochrany)  
definované v těle

Ekvivalentní dávka,  $H_T$   
v orgánu nebo tkáni T

Efektivní dávka,  $E$

Dávkový úvazek  $H_T(\tau)$ ,  $E(\tau)$   
Kolektivní efektivní dávka,  $S$

Operační veličiny pro  
měření a odhad dávek  
v těle

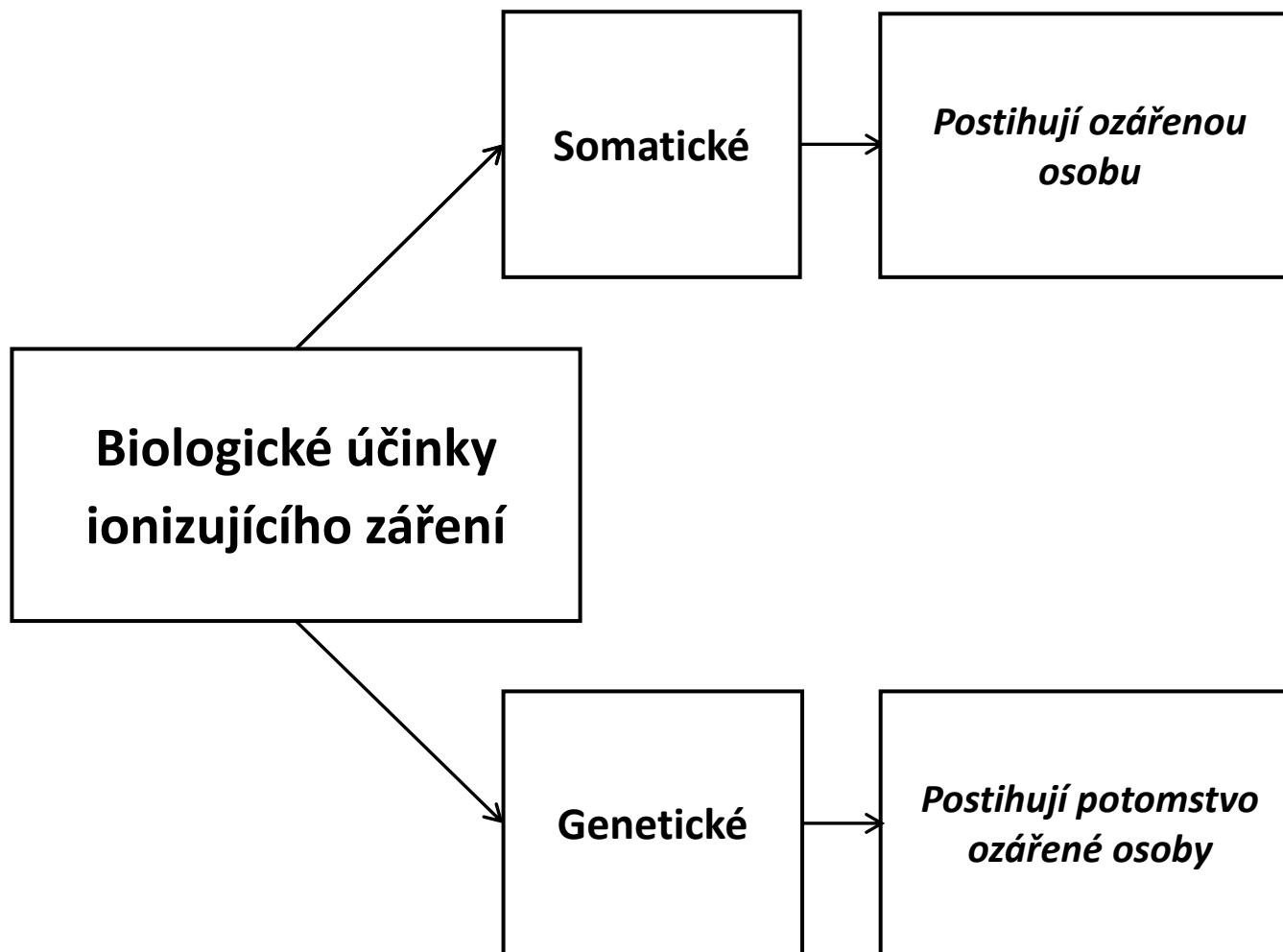
Pro zevní expozice

Dávkové veličiny pro monitorování prostředí  
Dávkové veličiny pro osobní monitorování

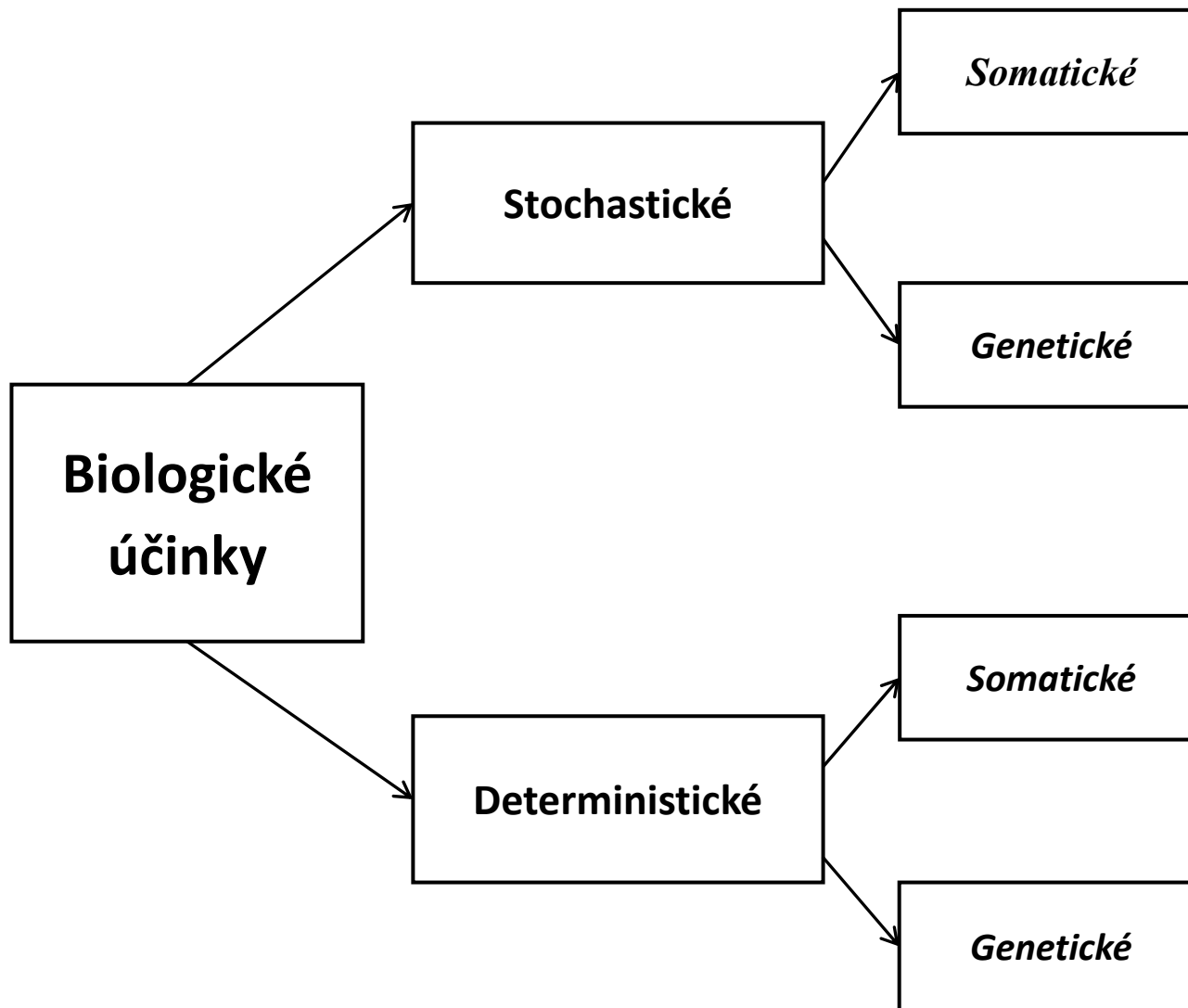
Pro vnitřní expozice

Měření, např. koncentrací ve vzduchu nebo těle,  
používaná k odhadu příjmu

**System velicin pro davkové limity a operačních velicin pro účely radiační ochrany**



**Biologické účinky ionizujícího záření s ohledem na postižené osoby**

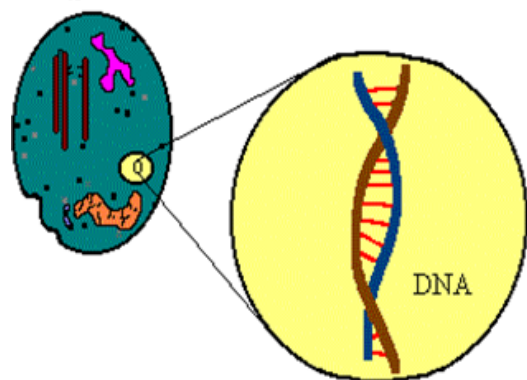


**Biologické účinky ionizujícího záření s ohledem na charakter postižení**

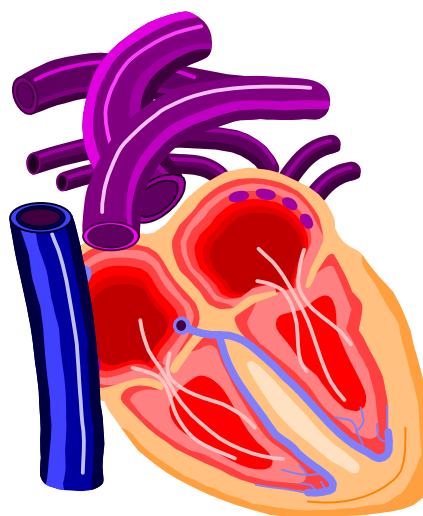


# Biologické účinky záření

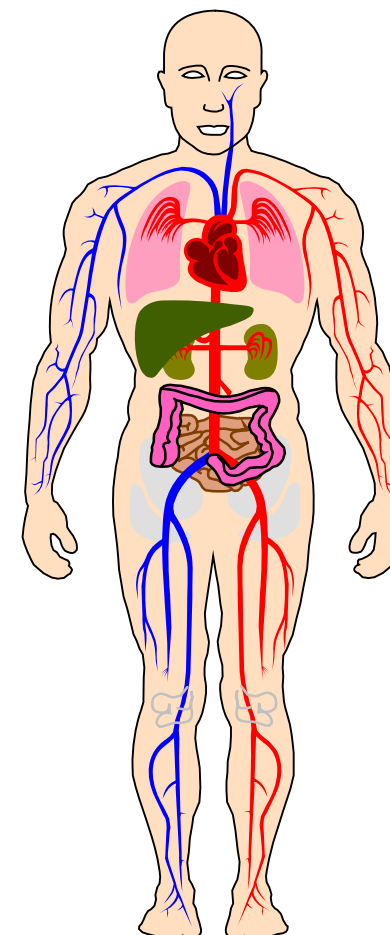
(od buňky přes orgány a tkáně k organismu)



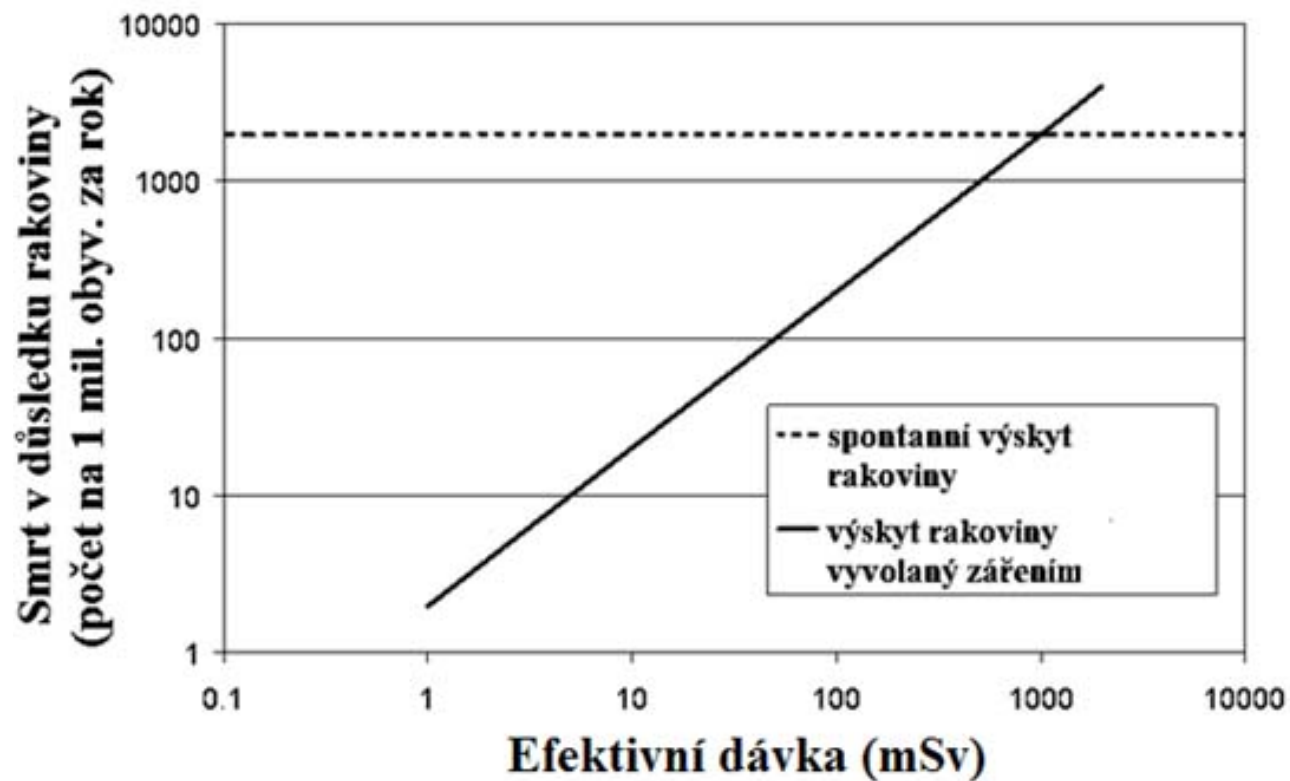
**Buňky**



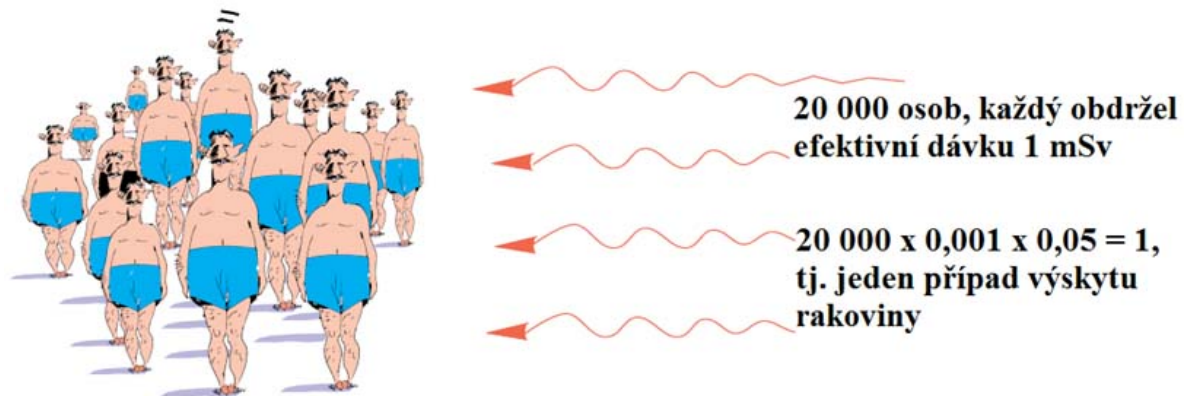
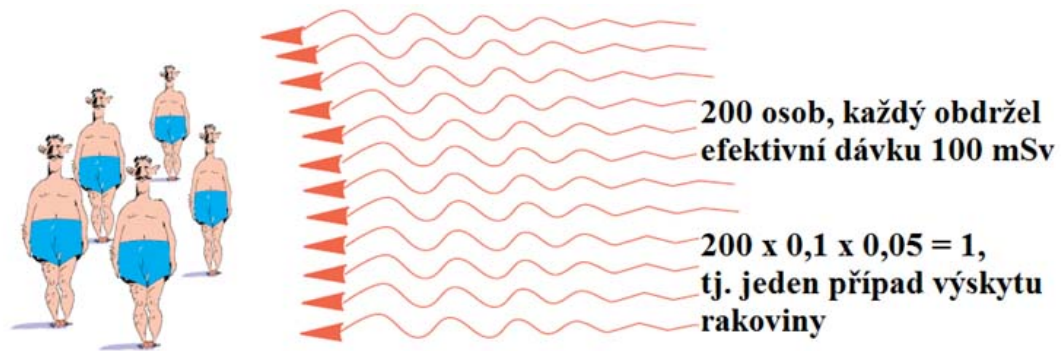
**Tkáně a orgány**



**Organismus**



Porovnání spontánního výskytu rakoviny s výskytem rakoviny, který by vyvolalo ozáření v závislosti na efektivní dávce. V této souvislosti je třeba vidět velikost ozáření v kontextu s přírodním radiačním pozadím (v České republice na úrovni 3 – 4 mSv/r) a s ozářením z aplikací v medicíně (např. vyšetření plic kolem 0,2 mSv, vyšetření počítačovou tomografií kolem 10 mSv)



**Ilustrace stochastických účinků na dvou skupinách osob s různou efektivní dávkou, ale stejnou kolektivní efektivní dávkou**

## Vztah mezi ozářením reprezentovaným efektivní dávkou a pravděpodobností indukce zdravotních účinků

Ozářené  osoby	Nominální koeficient rizika ( $10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ )					
	Rakovina		Dědičné účinky		Celkem	
	ICRP 103	ICRP 60	ICRP 103	ICRP 60	ICRP 103	ICRP 60
Celá populace	5,5	6,0	0,2	1,3	5,7	7,3
Dospělí	4,1	4,8	0,1	0,8	4,2	5,6

## Efektivní dávky z různých zdrojů podle UNCEAR 2000

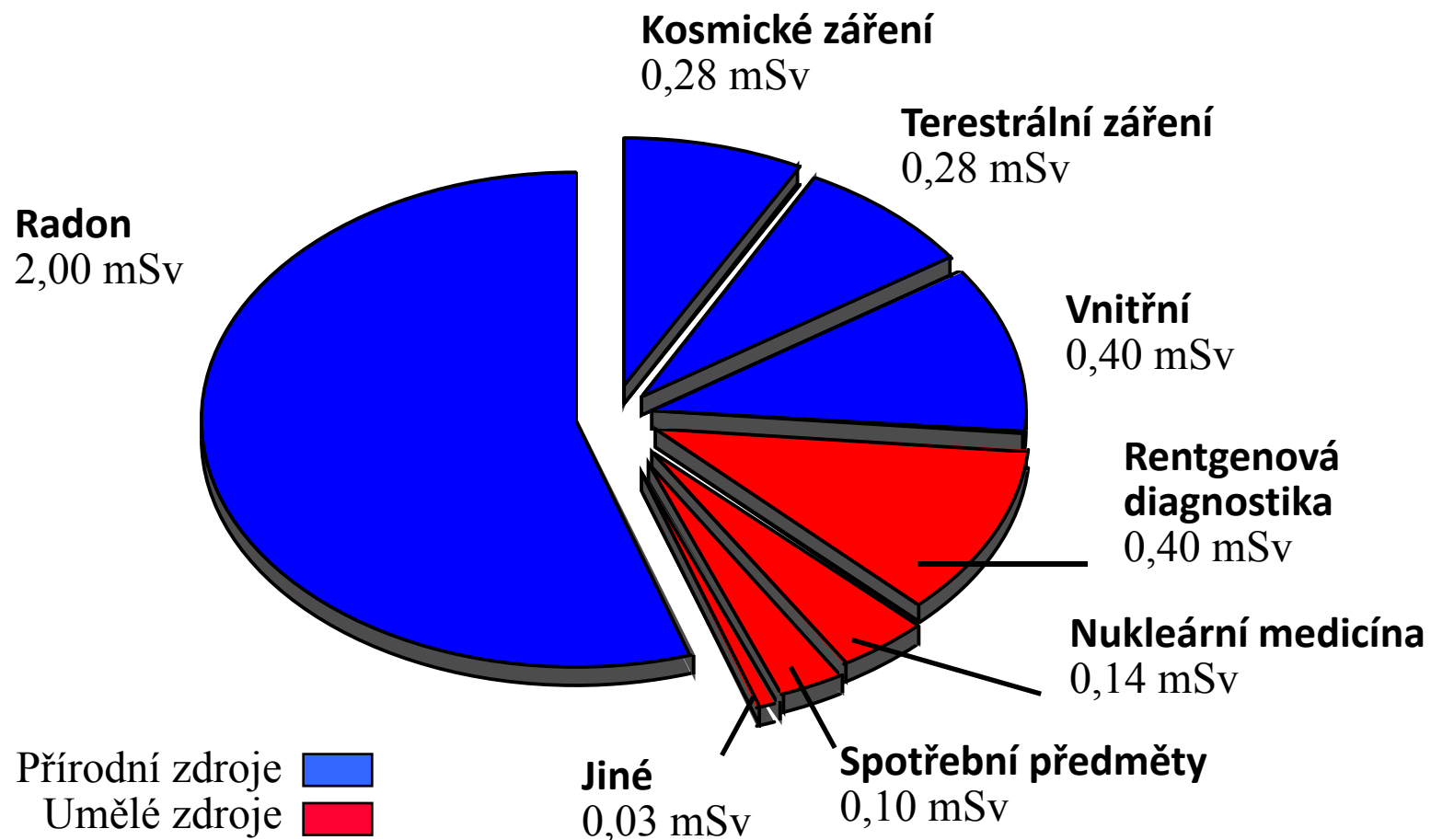
	Světová střední roční efektivní dávka [mSv]	Rozpětí, trendy
Přírodní pozadí	2,4000	1,00 – 10 mSv
Lékařská diagnostika	0,4000	0,04 – 1,00 mSv
Atmosférické testy zbraní	0,0050	(0,15 mSv v roce 1963 )
Cernobyl	0,0020	(0,04 mSv v roce 1986 )
Výroba energie	0,0002	

## Typické efektivní dávky z přírodních zdrojů

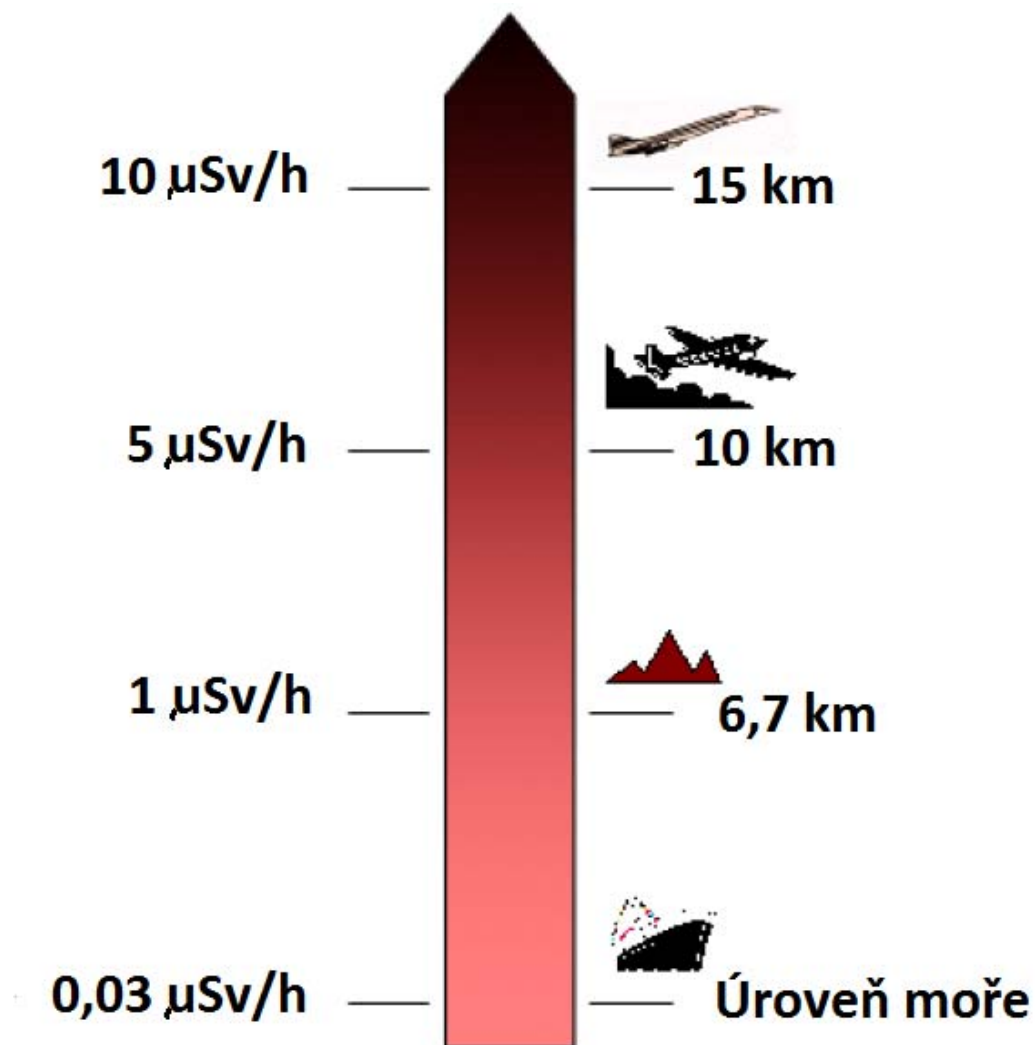
	Světová střední roční efektivní dávka [mSv]	Rozpětí [mSv]
<b>Vnější ozáření</b>		
Kosmické záření	0,4	0,3 – 1,0
Podloží ( $\gamma$ -záření)	0,5	0,3 – 0,6
<b>Vnitřní ozáření</b>		
Inhalace (radon)	1,2	0,2 - 10
Požítí (voda, potrava)	0,3	0,2 – 0,8
<b>Celkem</b>	2,4	1-10

**Některé údaje o ozáření obyvatel z různých přírodních zdrojů**

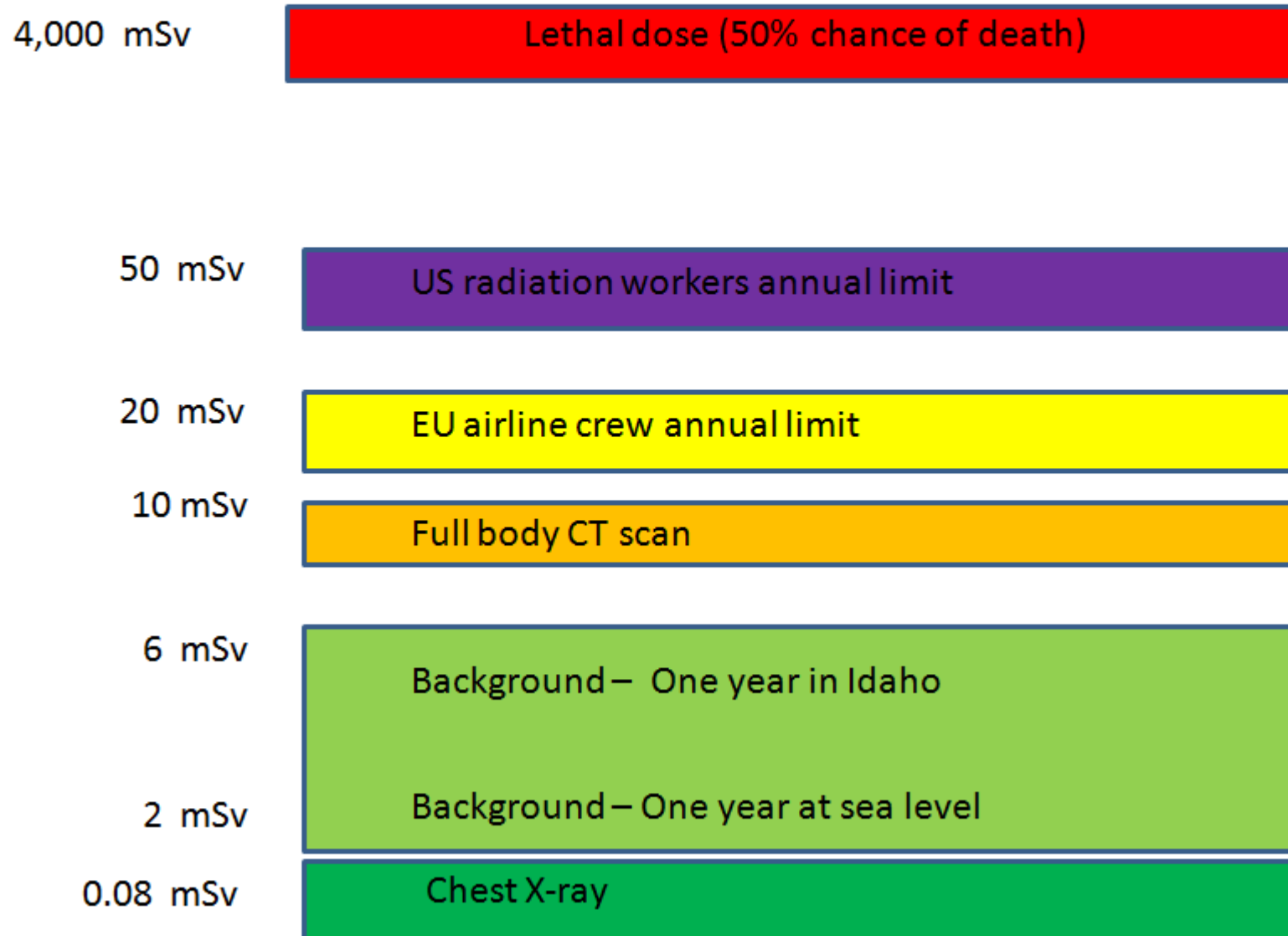
## Střední roční dávka



## Vliv nadmořské výšky na úroveň kosmického záření



# Radiation Exposures





Vyšetření	Projekce	Vstupní povrchová kerma $K_e^1$ (vztažená na 1 snímek) [mGy]
Bederní páteř	AP – projekce předozadní	10
	LAT – projekce boční	30
	LSJ – projekce na lumbosakrální přechod	40
Břicho, intravenosní urografie a cholecystografie	AP – projekce předozadní	10
Pánev	AP – projekce předozadní	10
Kyčelní kloub	AP – projekce předozadní	10
Hrudník	AP – projekce zadopřední	0,4
	LAT – projekce boční	1,5
Hrudní páteř	AP – projekce předozadní	7
	LAT – projekce boční	20
Lebka	AP – projekce zadopřední	5
	LAT – projekce boční	3
Zuby	Intraorální snímek	5
	Radioviziografie	1

<sup>1</sup>Kerma ve vzduchu v místě vstupu svazku do pacienta se započtením zpětného rozptylu. Hodnoty se tam, kde je používána zesilovací fólie, vztahují na kombinaci film – zesilující fólie s relativním zesílením 200. Pro kombinace s vyšším zesílením (400, popř. 600) by hodnoty měly být redukovány 2-krát, popř. 3-krát.

### Diagnostické referenční úrovně pro skiagrafická vyšetření

Diagnostické vyšetření		Typická efektivní dávka (mSv)	Přibližná doba pro stejně ozáření z přírodních zdrojů
<b>Konvenční rentgenová vyšetření</b>	Končetiny a klouby	< 0,01	< 1,5 dne
	Plíce (jeden PA snímek)	0,02	3 dny
	Lebka	0,07	11 dní
	Mamografie (screening)	0,1	15 dnů
	Kyčle	0,3	7 týdnů
	Pánev, hrudní páteř	0,7	4 měsíce
	Břicho	1,0	6 měsíců
	Bederní páteř	1,3	7 měsíců
	Polykací akt	1,5	8 měsíců
	IVU	2,5	14 měsíců
	Vyšetření žaludku, střevní pasáž	3	16 měsíců
	Irigoskopie	7	3,2 roku
<b>CT vyšetření</b>	CT hlavy	2,3	1 rok
	CT hrudníku	8	3,6 roku
	CT břicha nebo pánve	10	4,5 roku

**Typické hodnoty efektivních dávek pro vybraná konvenční rentgenová a CT vyšetření**