

Radiační biofyzika

Přednáška 6 2022

Radioaktivní přeměny,

Interakce IZ

Martin Falk



RADIOAKTIVITA

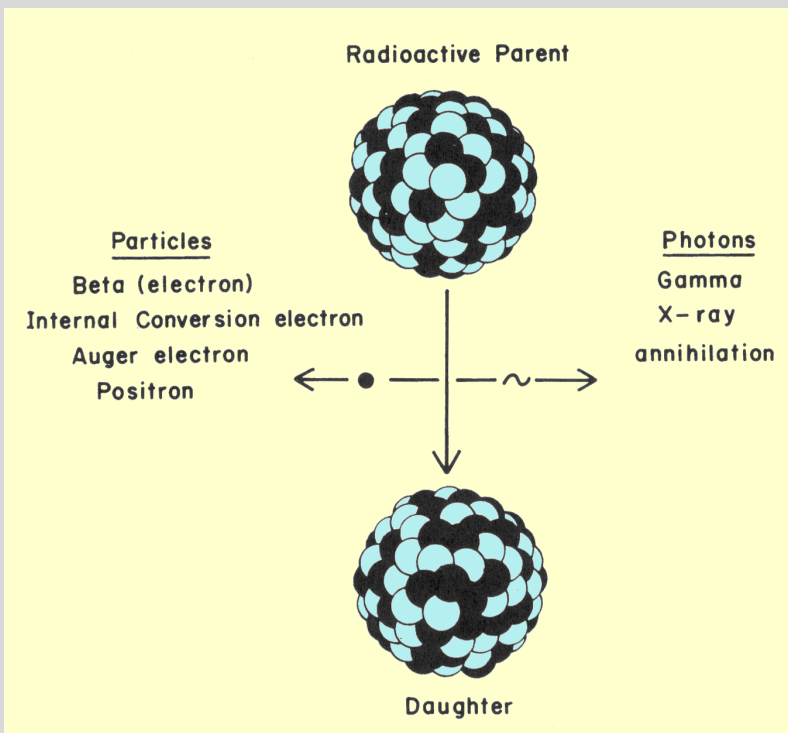
- $X \rightarrow Y + n \text{ částic (+E)}$

- **Základní hmotnostní podmínka radioaktivity:**

$$M(X) > M(Y) + M(\text{ČASTIC})$$

- **Energie uvolněna při radioaktivní přeměně:**

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



- Aby k radioaktivní přeměně mohlo dojít, musí být podle zákona zachování energie splněna **hmotnostně~energetická** podmínka $m(Y) + m(\text{č}) < m(X)$, kde $m(X)$ je hmotnost mateřského jádra X (analogicky u dceřinného jádra Y) a $m(\text{č})$ je klidová hmotnost emitované částice č .

- Při jaderné přeměně se uvolňuje **kinetická energie** $\Delta E = [m(X) - m(Y) - m(\text{částic})] \cdot c^2$, jejíž většinu odnáší emitovaná částice, malou část též výsledné jádro Y , odražené v důsledku zákona akce a reakce.

- Energetický rozdíl mezi základními stavy rodičovského a dceřinného systému se nazývá **energie přeměny Q** .

PROCES ROZPADU RADIOAKTIVNÍCH JADER

- radioaktivní jádra nemají paměť
- MÁ STATISTICKOU PODSTATU

➤ radionuklid s N radioaktivními jádry:

➤ **pravděpodobnost rozpadu** každého jádra daného nuklidu za pevně zvolený časový interval je v každém okamžiku **stejná**



úbytek jader v čase $-\frac{dN}{dt}$ je úměrný jejich výchozímu počtu N a závisí na **přeměnové (rozpadové) konstantě** [s^{-1}]

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N = A$$

λ je charakteristickou konstantou daného nuklidu

Př.: $\lambda = 1 \cdot 10^{-3} s^{-1} \rightarrow$ za 1 s se rozpadne 1/1000 z přítomného počtu jader

$$dN = -\lambda N dt$$

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

$$\int_{N_0}^N \frac{dN_t}{N_t} = -\lambda \int_0^t d\tau$$

integrace

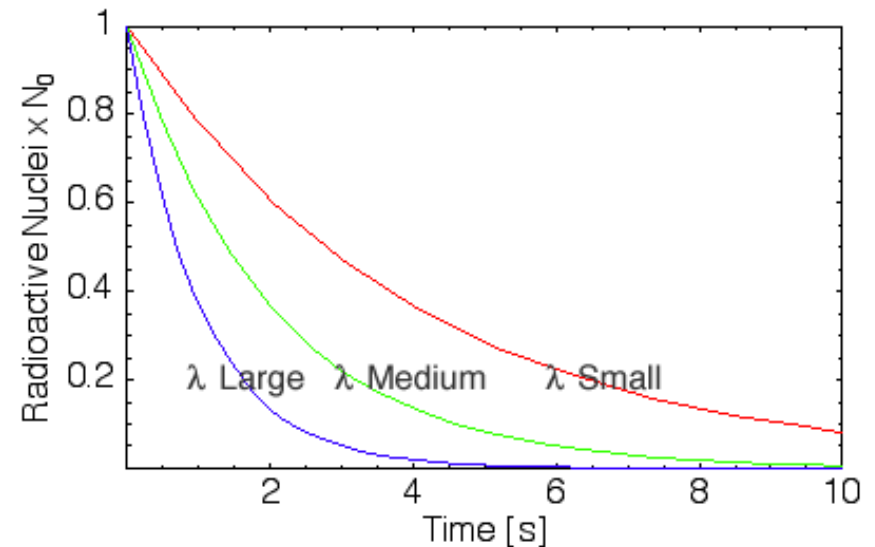
$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

N_0 je počet jader ve vzorku v čase $t = 0$

N je počet zbylých (nerozpadlých) jader v libovolném následujícím okamžiku t

e – Eulerovo číslo, 2,71828.....

.....**PŘEMĚNOVÝ (ROZPADOVÝ) ZÁKON**



- rozpad není ovlivněn tlakem a teplotou
- přeměnová konstanta nezávisí na chemickém stavu atomu, vyjma rozpadů, které jsou spojeny s interakcí obalového elektronu (EZ, vnitřní konverze)
- u větvené přeměny je celková pravděpodobnost dána součtem

(FYZIKÁLNÍ) POLOČAS ROZPADU

doba T , za kterou se samovolně přemění **přesně polovina** původního počtu jader

dosadíme: $t = t_{1/2}$

$$N = \frac{1}{2} N_0$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}}$$

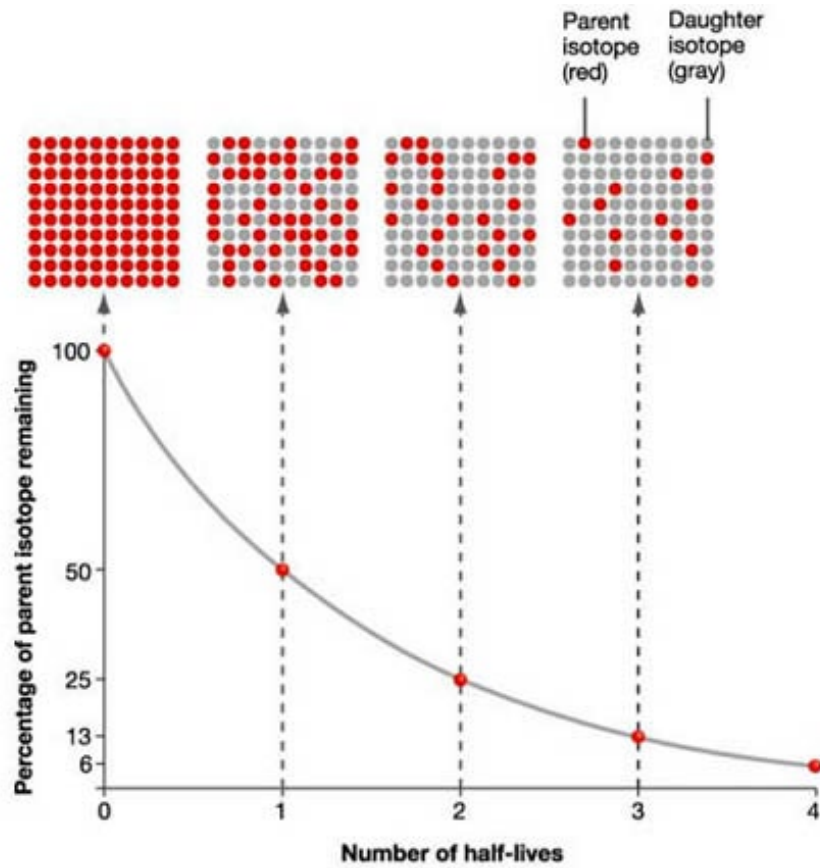
$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}}$$

logaritmujeme

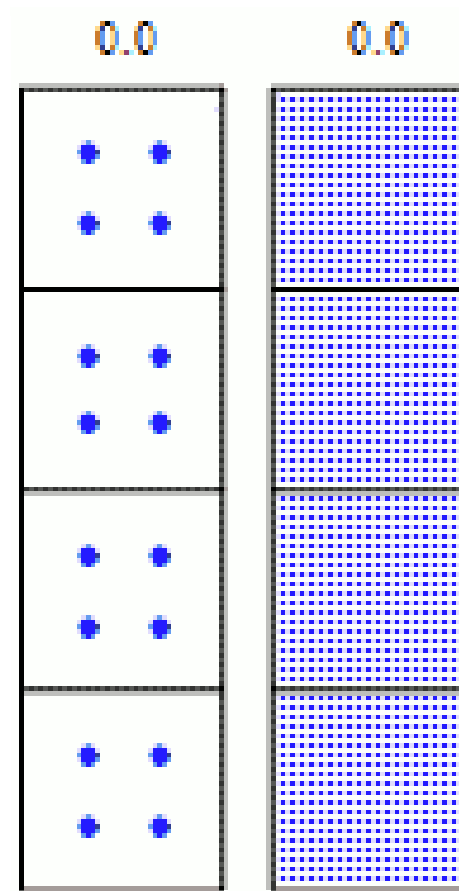
$$\lambda T = -\ln \frac{1}{2}$$

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

POLOČAS ROZPADU



The number represents how many half lives have passed.



Střední doba života jádra

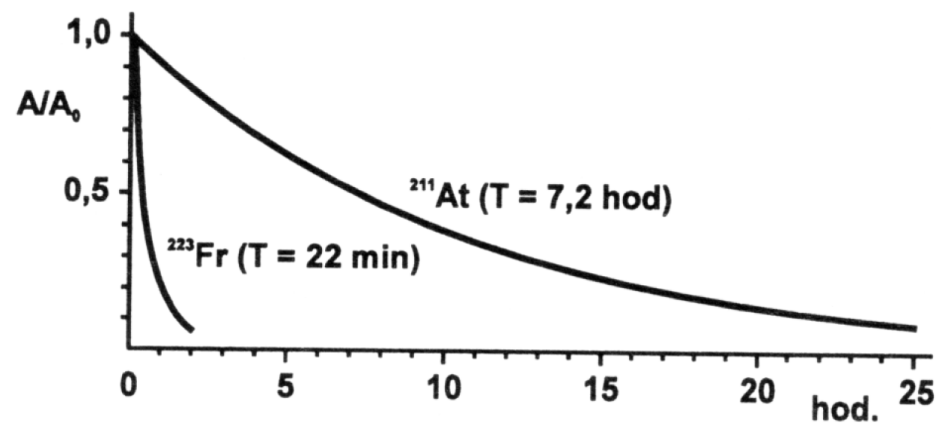
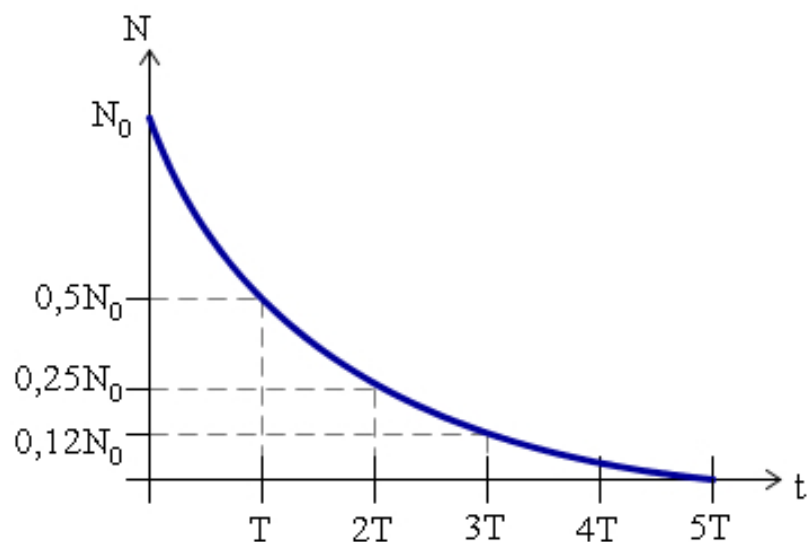
Vedle rozpadové konstanty λ a poločasu rozpadu $T_{1/2}$ se někdy zavádí **střední doba života** jádra,

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = T_{1/2} / \ln 2 \quad [\text{s}]$$

Poznámka:

Nomenklatura $T = T_{1/2} = t_{1/2}$

- což je **pravděpodobnost přeměny** radioaktivního atomu za časovou jednotku
- zároveň doba ($t=\tau$), za kterou klesne aktivita na $1/e \cong 0,3679$ své původní hodnoty.
- Všechny tyto tři veličiny (**poločas přeměny $T_{1/2}$, přeměnová konstanta λ a střední doba života τ**) udávají, jak rychle se radionuklid přeměňuje či rozpadá.



Přeměnové konstanty a poločasy některých radioaktivních nuklidů.

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

seaborgium

AKTIVITA RADIONUKLIDU

= rychlost rozpadu radionuklidu:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

z přeměnového zákona: $N = N_0 e^{-\lambda t} =$

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

n = počet poločasů rozpadu

t = n.T

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 \cdot (1/2)^{t/T} = A_0 \cdot (1/2)^n$$

$A_0 = \lambda N_0$... rychlost rozpadu v čase $t = 0$

A ... aktivita v libovolném následujícím okamžiku t

$T =$ poločas rozpadu; $n =$ počet poločasů rozpadu

JEDNOTKY AKTIVITY RADIONUKLIDU:

současná jednotka (dle objevitele) **becquerel**

1 becquerel = 1 Bq = 1 rozpad za sekundu

starší jednotka (stále užívaná) **curie**

1 curie = 1Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq

Poznámka: Zároveň pomocí A můžeme vyjadřovat množství radionuklidu

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

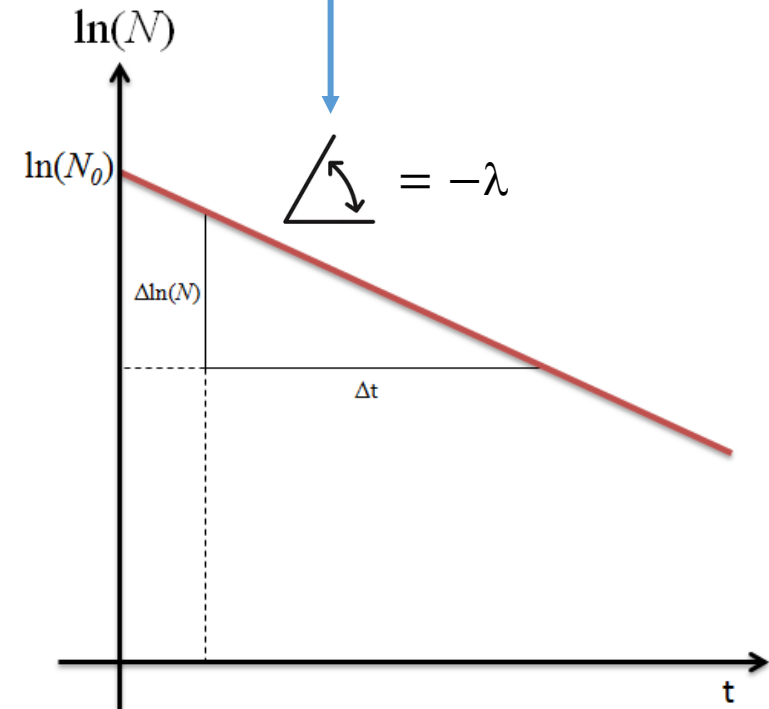
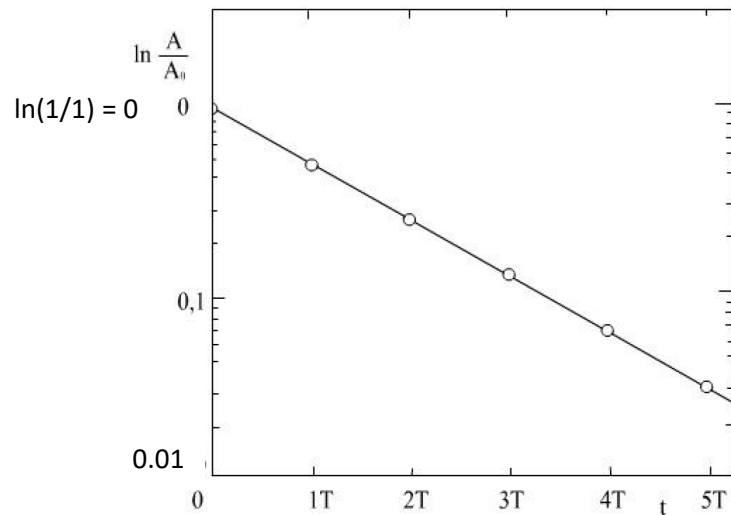
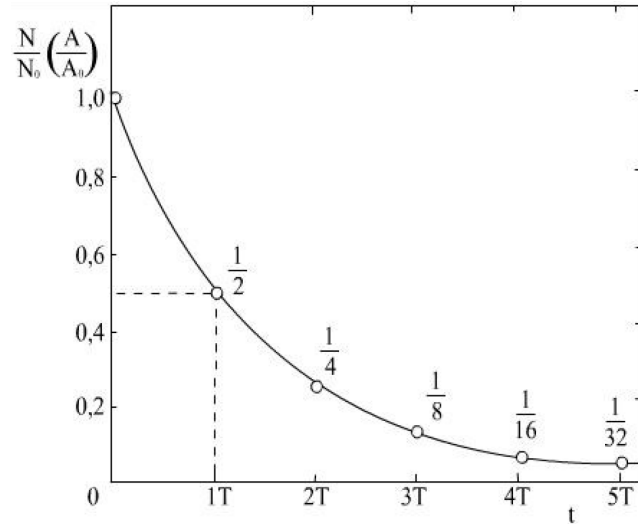
$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = \ln e^{-\lambda t}$$

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda t$$

$$\ln N = -\lambda t + \ln N_0$$

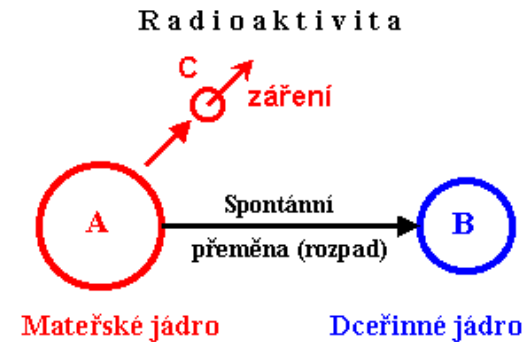
$$y = mx + b$$



PRŮBĚH RADIOAKTIVNÍ PŘEMĚNY

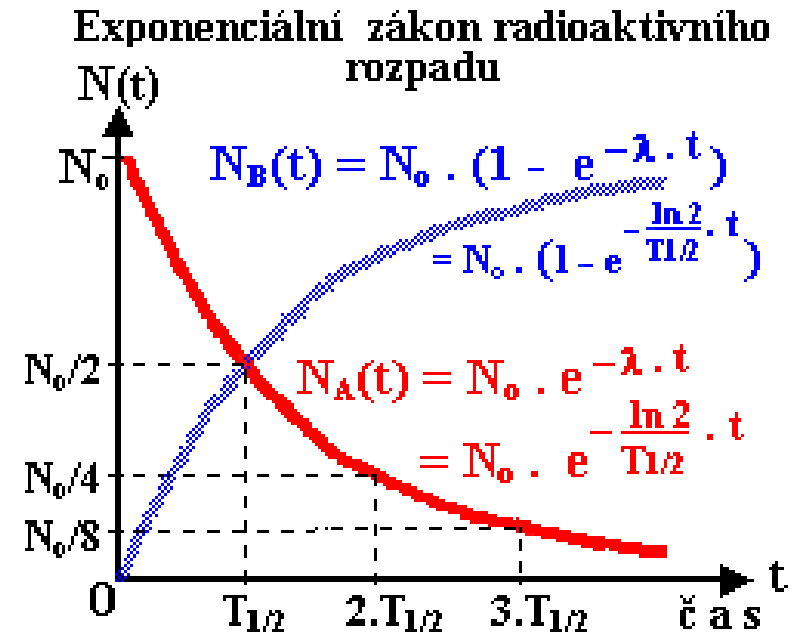
➤ exponenciální přeměnový zákon platí pro **všechny druhy záření**

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$



A) během dostatečně dlouhé doby se mateřský prvek **přemění úplně** v prvek dceřinný (pokud ten není dále radioaktivní)

B) je-li **dceřinný prvek dále radioaktivní** (λ'), produkty radioaktivního rozpadu vytvářejí **radioaktivní přeměnové řady**



Měrná aktivita

Aktivita se často vztahuje na:

- hmotnostní jednotku (hmotnostní měrná aktivita)...Bq/kg
- objemovou jednotku (objemová měrná aktivita).....Bq/l
- látkové množství (molární měrná aktivita).....Bq/mol

$$a_{Ra} [\text{Bq/g}] \simeq 3,7 \times 10^{10} [\text{Bq/g}]$$

Tato hodnota měrné aktivity radia-226 je definována jako jednotka aktivity 1 [curie](#)

současná jednotka (dle objevitele) **becquerel**
1 becquerel = 1 Bq = 1 rozpad za sekundu

starší jednotka (stále užívaná) **curie**
1 curie = 1 Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq

Základní typy přeměn (8 typů + 3 procesy deexcitace)

Typ přeměny	Reakce	Popis přeměny
Přeměna α	${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2\text{He}$	Z jádra je emitována částice složená ze dvou protonů a dvou neutronů – částice α
Přeměna β^-	${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + {}^0_{-1}e + \bar{\nu}$	Z jádra je emitována částice β^- a antineutrino.
Přeměna β^+	${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + {}^0_{+1}e + \nu$	Z jádra je emitována částice β^+ a neutrino.
Elektronový záchyt	${}^A_ZX + {}^0_{-1}e \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + \nu$	Jádrem je zachycen orbitální elektron a z jádra je emitováno neutrino
Emise protonů	${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-1}_{Z-1}Y + {}^1_1p$	Z jádra je emitován proton
Emise neutronů	${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-1}_ZY + {}^1_0n$	Z jádra je emitován neutron

obdoba β^+

Základní typy přeměn (8 typů + 3 procesy deexcitace)

Typ přeměny	Reakce	Popis přeměny
Samovolné štěpení	${}^A_ZX \rightarrow {}^{A_1}_{Z_1}Y + {}^{A-A_1}_{Z-Z_1}Z + xn$	Jádro se rozděluje na dva fragmenty a několik neutronů
Emise těžkých jader	${}^A_ZX \rightarrow {}^{A_1}_{Z_1}Y + {}^{A-A_1}_{Z-Z_1}Z$	Z jádra jsou emitovány těžké částice
Přeměna γ	${}^A_ZX^* \rightarrow {}^A_ZX + \gamma$	Excitované jádro okamžitě přechází do základního stavu emisí fotonů záření gama
Izomerický přechod	${}^{A_m}_ZX \rightarrow {}^A_ZX + \gamma$	Excitované jádro v metastabilním stavu přechází do základního stavu emisí fotonů záření gama
Vnitřní konverze	${}^A_ZX^* \rightarrow {}^A_ZX + e^-$	Jádro v excitovaném stavu předává veškerou přebytečnou energii orbitálnímu elektronu

= obdoba emise α

+ rozpady s emisí více částic (p^+ , ...)

Procesy deexcitace jader po předchozím rozpadu

Skupiny radioaktivních přeměn:

1.mění se Z při konstantním A

- β^-
- β^+
- EZ = elektronový záchyt)

2.mění se Z i A

- α ,
- emise nukleonů
- emise těžších jader ^{14}C , ^{24}Ne ,
- SŠ = samovolné štěpení

3.deexcitace jádra (A i Z konst.)

- γ emise okamžitá
- γ emise zpožděná (izomerický přechod),
- vnitřní konverze

8 základních přeměn

- Všechny jsou doprovázeny emisí elementárních částic, které jsou schopny ionizovat okolní látku

Částice (hmotné i nehmotné), které jsou uvolněny v **jádře**, označujeme:

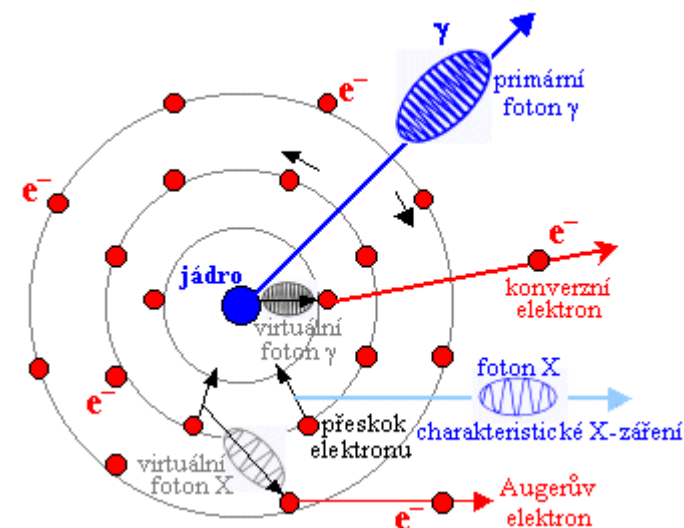
- částice α ,
- částice β (β^- , β^+),
- neutrony,
- fotony γ .

Vedle těchto částic vzniklých v jádře se z **elektronového obalu** uvolňují i elektrony, které **podle** mechanismu vzniku označujeme:

- konverzní elektrony,
- Augerovy elektrony.

V elektronovém obalu dále vznikají i fotony elektromagnetického záření, které nazýváme:

- brzdné záření, viz přednáška 1 – RTG záření
- charakteristické záření,
- anihilační záření. (doprovází β^+)

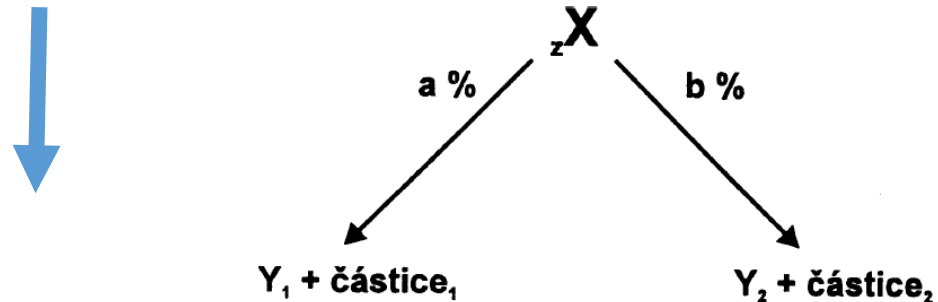


Větvené přeměny

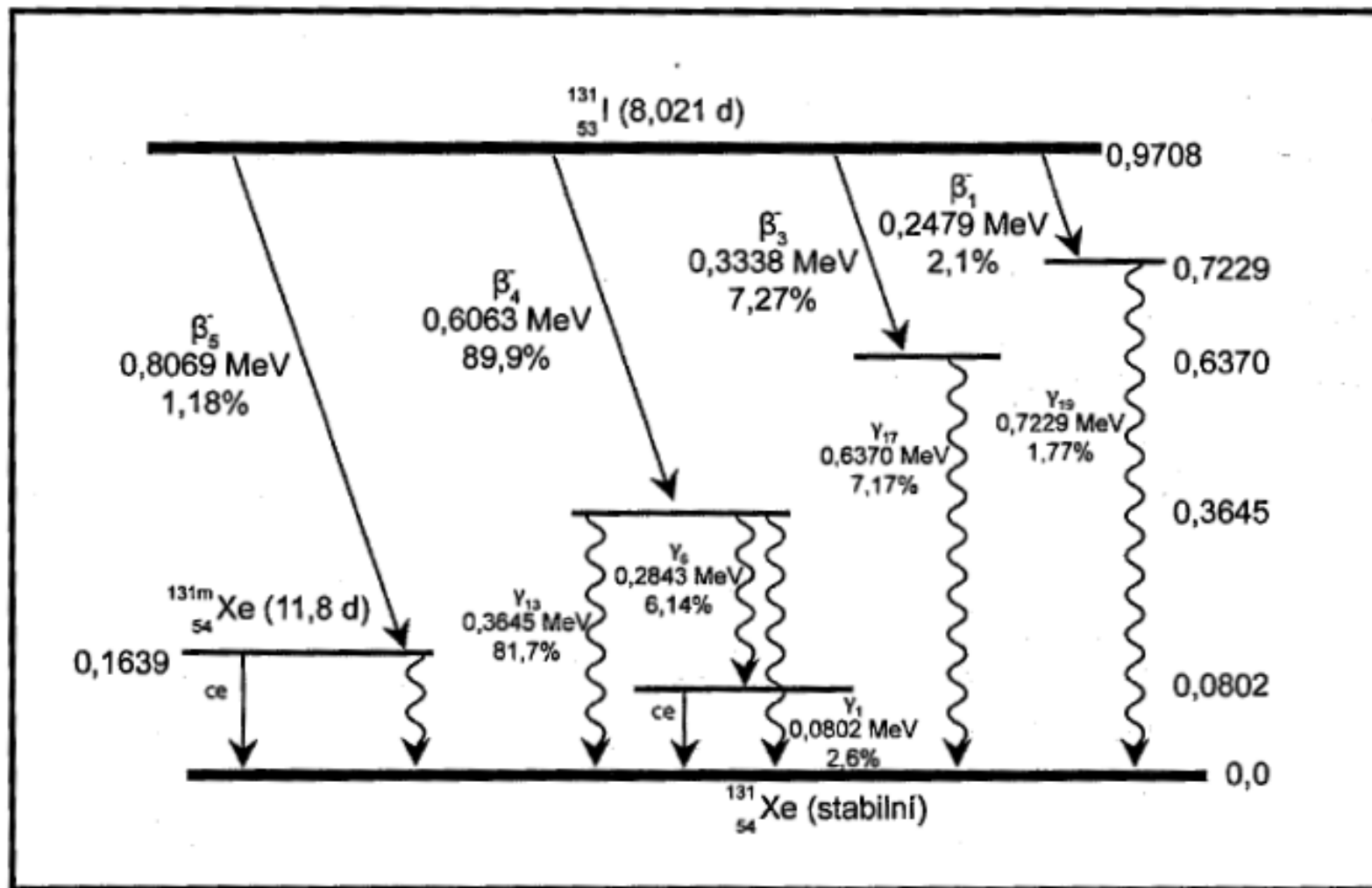
Vedle těchto jednoduchých přeměn s emisí jedné částice existuje celá řada složitějších přeměn s emisí několika částic. Např.

$$2\beta^+; 2\beta^-; \beta^-, d; \beta^+, \alpha; \beta^-, n; ec, \alpha; \dots$$

Jednotlivé radioaktivní přeměny, uvedené v tabulce 4.2, se u reálných přeměn vyskytují samostatně jen sporadicky. Většinou jsou doprovázeny alternativním druhem jaderné přeměny. Proto se u rozpadových schémat uvádějí pravděpodobnosti jejich výskytu. Na obr. 4.4 je znázorněno schéma rozpadu izotopu $^{131}_{53}I$. Najdeme zde několik přeměn β^- , γ , kde dochází na slupce K nebo L k vnitřní konverzi a je následně emitováno charakteristické záření. Z toho je vidět, že přeměny jednotlivých izotopů jsou složitým mechanismem několika základních typů přeměn popsaných v předcházející části.



Větvené přeměny - Rozpadové diagramy



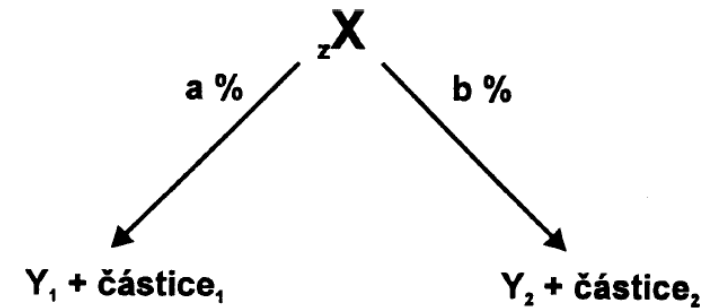
Obrázek 4.4 Rozpadové schéma ^{131}I

ce: conversion electron

Větvené přeměny

α/β^-	u těžkých nuklidů
α / samovolné štěpení	u těžkých jader, přeměna je méně pravděpodobná jako přeměna α . Úbytek radionuklidu je řízen poločasem α přeměny – je kratší.
α / elektronový záchyt	u těžkých jader
β^+ / elektronový záchyt	u lehčích radionuklidů s nadbytkem protonů
β^- / elektronový záchyt	vzácný případ

- probíhají najednou v různém zastoupení
- hmotnostní podmínka přeměny umožňuje dva či více typů přeměny
- každá dílčí přeměna má svou pravděpodobnost a energii



ZASTOUPENÍ JEDNOTLIVÝCH TYPŮ RADIOAKTIVNÍCH PŘEMĚN

Tabulka 4.1 Zastoupení jednotlivých typů jaderných přeměn

	Základní stav	Metastabilní stav	Σ
Stabilní jádra	214	0	214
alfa	424	80	504
beta-	1174	131	1305
ec/beta+	1044	214	1258
IT	--	334	334
n	28	--	28
SF	38	2	40
p	81	4	85
CE	112	4	116
Celkem	3115	769	3884

IT – vnitřní konverze, **ec** –elektronový záchyt, **SF** – spontánní štěpení, **CE** – emise těžkých jader (cluster emission)

ZÁKONY PLATNÉ PŘI RADIOAKTIVNÍCH PŘEMĚNÁCH

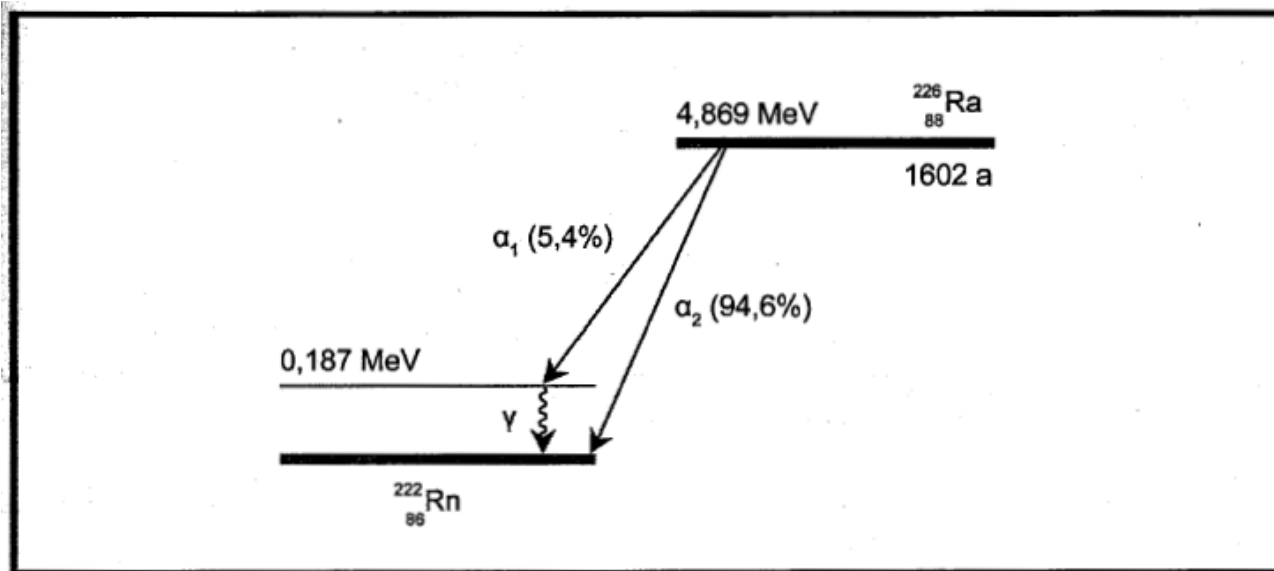
Zákony klasické fyziky

- ZZM, ZZE
- Zákon zachování hybnosti
- Zákon zachování elektrického náboje

Specifické zákony

- Zákon zachování nukleonového a protonového čísla: $A=A_1+A_2$; $Z=Z_1+Z_2$
- Zákon zachování baryonového čísla
- Zákon zachování leptonového čísla

ROZPAD α



Obrázek 4.7 Rozpadové schéma ^{226}Ra .

Pro energetický výtěžek α přeměny ΔE platí rovnice:

$$\Delta E = (M_X - M_Y - m_\alpha) \cdot c^2,$$

$$\Delta E \cong (M_X - M_Y - M_\alpha) \cdot c^2,$$

kde M_X je atomová hmotnost původního (mateřského) nuklidu X,
 M_Y atomová hmotnost vzniklého (dceřiného) nuklidu Y,
 m_α hmotnost jádra ^4_2He ,
 M_α hmotnost atomu ^4_2He .

VLASTNOSTI ZÁŘENÍ α :

- α -částice:
 - má relativně nízkou hmotnost
 - a dostatečně velkou vazebnou energii (stabilní částice)
- Její tvorba **je energeticky výhodnější jako „samostatný“ shluk nukleonů**
- Přímě ionizující záření
- „částicového“ charakteru

Dolet částic α :

= dráha, na které ztratí částice veškerou svou energii

- v plynech řádově centimetry
- v kapalinách a pevných látkách setiny milimetrů

Spontánní α rozpad uranu



$$\begin{aligned}\Delta m c^2 &= \\ (238,050\,79 - 234,043\,63 - 4,002\,60) \text{u} c^2 &= \\ 0,00456 \text{u} c^2 &= \boxed{4,25 \text{MeV}}\end{aligned}$$

Spontánní rozpad nastává, poločas rozpadu je $4,47 \cdot 10^9$ let.



~~$$\begin{aligned}\Delta m c^2 &= \\ (238,050\,79 - 237,051\,21 - 1,007\,83) \text{u} c^2 &= \\ -0,00825 \text{u} c^2 &= \boxed{-7,68 \text{MeV}}\end{aligned}$$~~

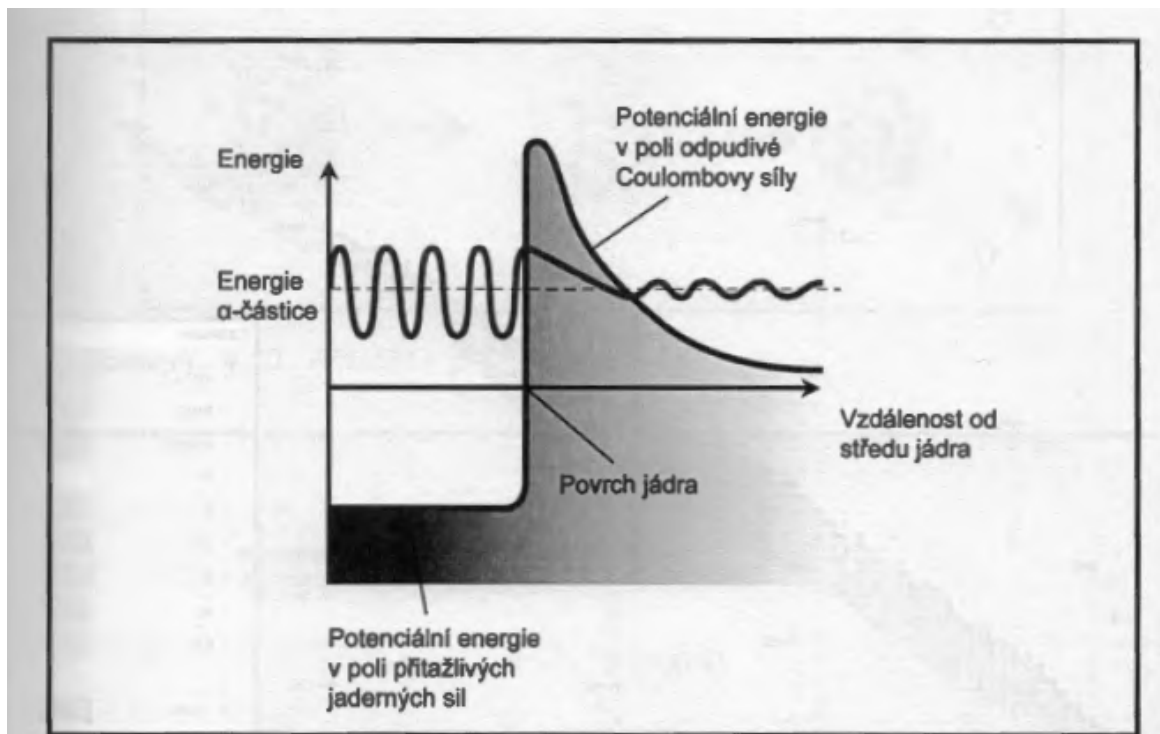
Spontánní rozpad nemůže nastat.

Hmotnostní přebytek nuklidu

$$\frac{\Delta}{u} = \left(\frac{m}{u} - A \right)$$

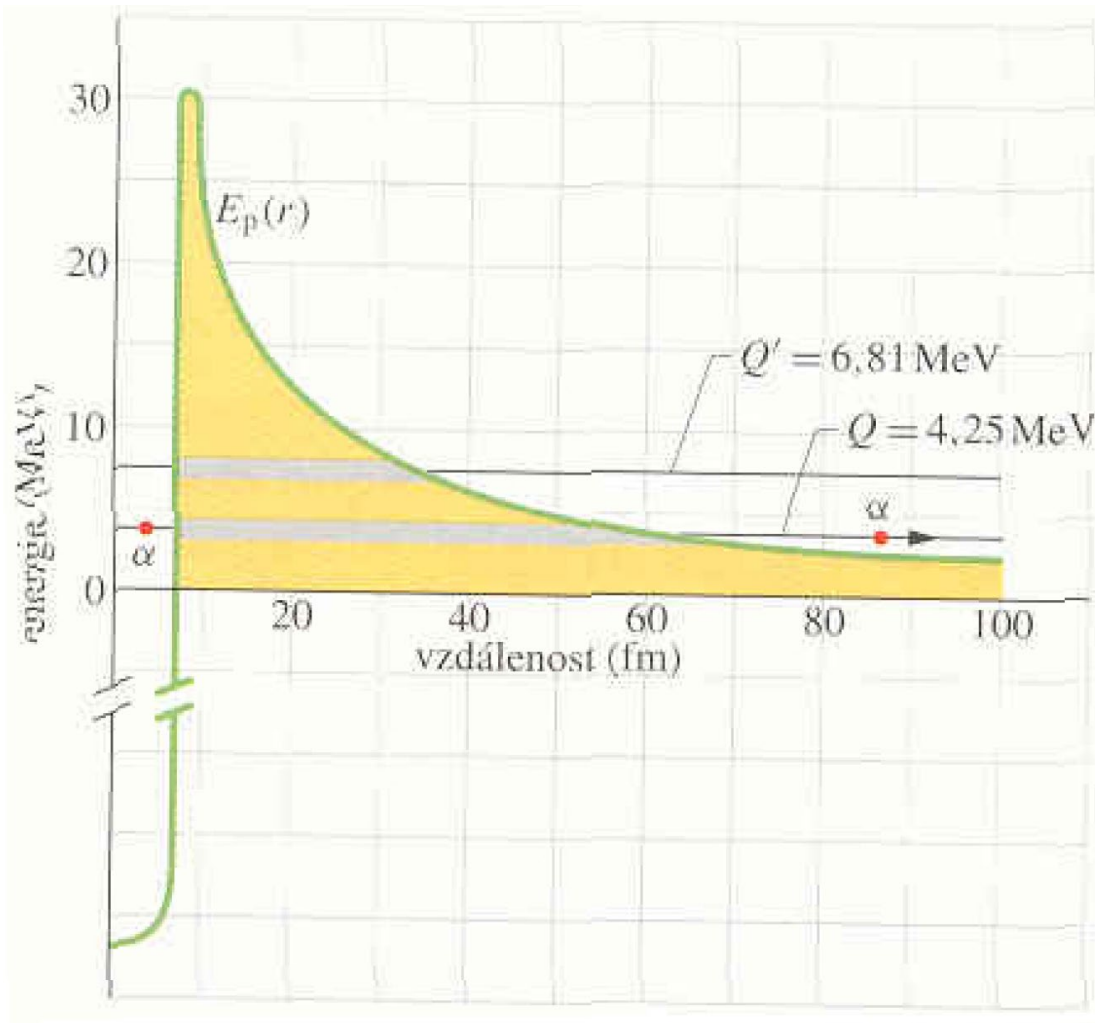
	Z	A	Δ/u
proton	1	1	0,007 276
neutron	0	1	0,008 665
deuteron	1	2	0,013 553
triton	1	3	0,015 501
helion	2	3	0,014 932
α částice	2	4	0,001 506

Tunelový efekt – α -částice



Obrázek 4.8 Průchod částice α potenciální bariérou

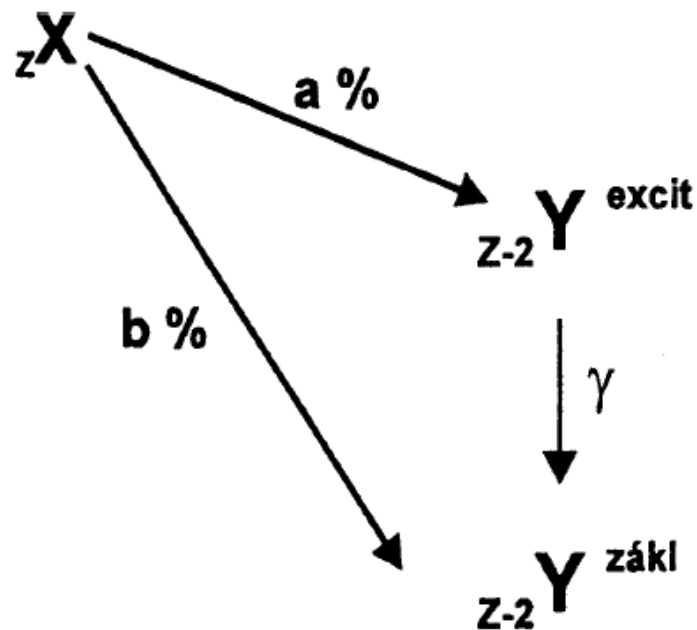




Radionuklid	Q	Poločas rozpadu
^{238}U	4,25 MeV	$4,5 \cdot 10^9$ roku
^{228}U	6,81 MeV	9.1 min

- Potenciální energie při emisi α - částice jádrem ^{238}U
 $Q = 4,25 \text{ MeV}$
- (ukazuje energii rozpadu)
- Tlustá šedá část této přímky ukazuje vzdálenosti r , které jsou pro α -částici klasicky zakázané.
- Částice α je znázorněna jako bod, jak uvnitř potenciálové jámy (nalevo), tak vně (napravo) poté, co protunelovala.
- Potenciální energie při emisi α - částice jádrem ^{228}U
 $Q = 6,81 \text{ MeV}$ (zhruba o 60% vyšší než ^{238}U)
- Oba izotopy mají stejnou křivku potenciální energie, protože mají stejný náboj jádra.
- Poněvadž poločas rozpadu ^{238}U je velmi dlouhý nemůže být potenciálová bariéra příliš „prostupná“.
- Částice α , která poskakuje sem a tam uvnitř jádra, musí narazit na vnitřní stěnu bariéry zhruba **10^{38} krát**, než se jí podaří uniknout tunelováním.
- Toto číslo odpovídá 10^{21} nárazům za sekundu po dobu $4 \cdot 10^9$ let. My ovšem čekáme na vnější straně a můžeme zaznamenat jen ty α -částice, kterým se *podařilo* uniknout.

Přeměna α může probíhat za vzniku dceřiného jádra **v základním (a)** nebo **vzbuzeném stavu (b)**



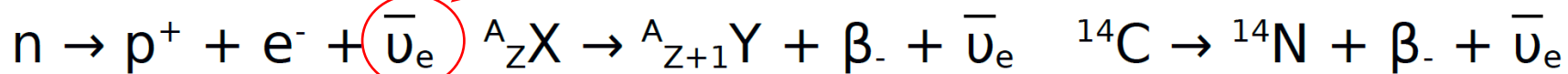
nuklid X	nuklid Y	a (%)	b (%)	E_α (MeV)	E_γ (MeV)
${}^{210}\text{Po}$	${}^{206}\text{Pb}$	~ 100	0,001	a: 5,30 b: 4,50	0,8
${}^{226}\text{Ra}$	${}^{222}\text{Rn}$	94,3	5,7	a: 4,77 b: 4,59	0,18
${}^{232}\text{Th}$	${}^{228}\text{Ra}$	80	20	a: 3,98 b: 3,90	0,08
${}^{238}\text{U}$	${}^{234}\text{Th}$	77	23	a: 4,24 b: 4,19	0,05

Často se pozoruje emise více skupin α částic \Rightarrow musí existovat více excitovaných stavů dceřiných jader.

Druhy radioaktivních přeměn: **ZÁŘENÍ β^-** (negatronová přeměna)

A) **Přeměna β^- .** Hmotnostní podmínka: **$M(A, Z) > M(A, Z+1) + m_e$**

elektronové anti-neutrino (zákon zachování leptonového čísla)

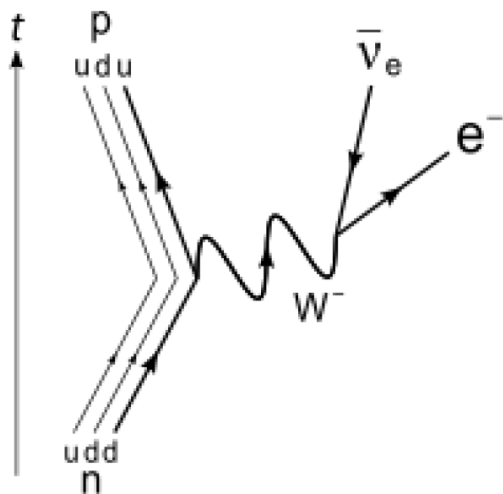


měříme

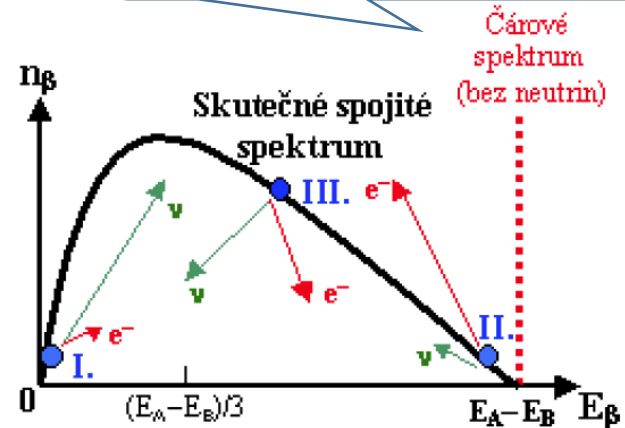
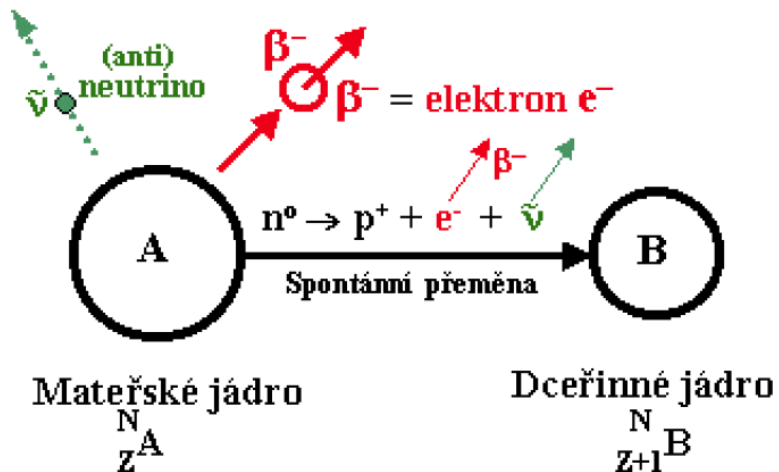


Energie se rozdělí mezi jádro (málo), elektron a ν_e náhodně, spektrum je proto spojité.

Maximální energie beta záření je pro danou přeměnu charakteristická a slouží k identifikaci přeměňujícího se radionuklidu.



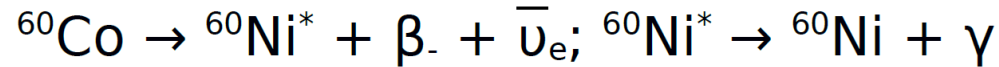
Radioaktivita β^-



Jádro γ vzniká: (po rozpadu β -)

a) v základním stavu ${}^3\text{H}$, ${}^{14}\text{C}$, ${}^{32}\text{P}$, ${}^{35}\text{S}$

b) v excitovaném stavu (poté dochází k emisi 1 či více γ)



Může vznikat i směs a) a b)

ZÁŘENÍ γ

➤ **elektromagnetické záření**

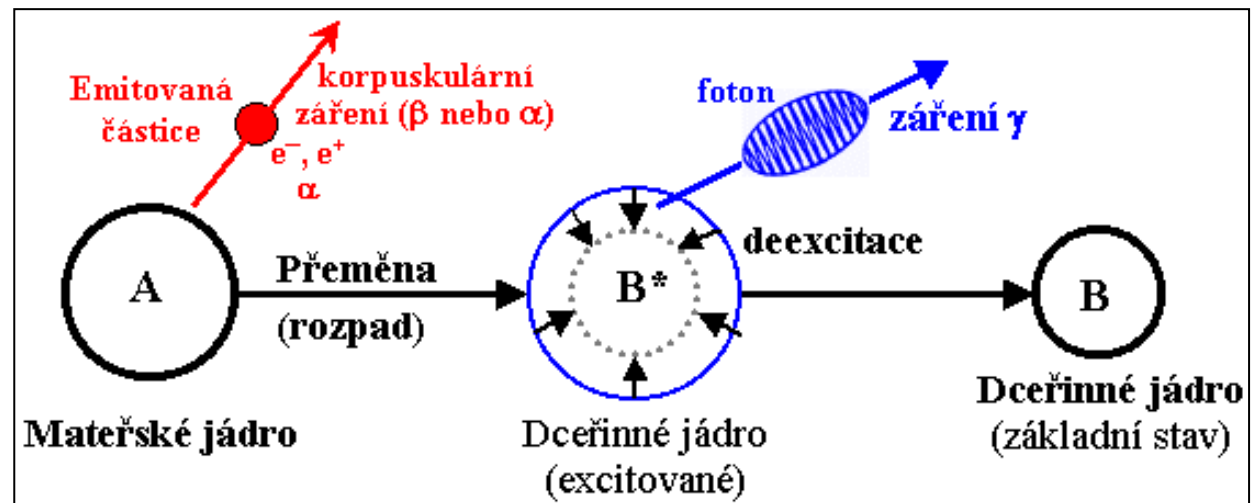
o velmi krátkých

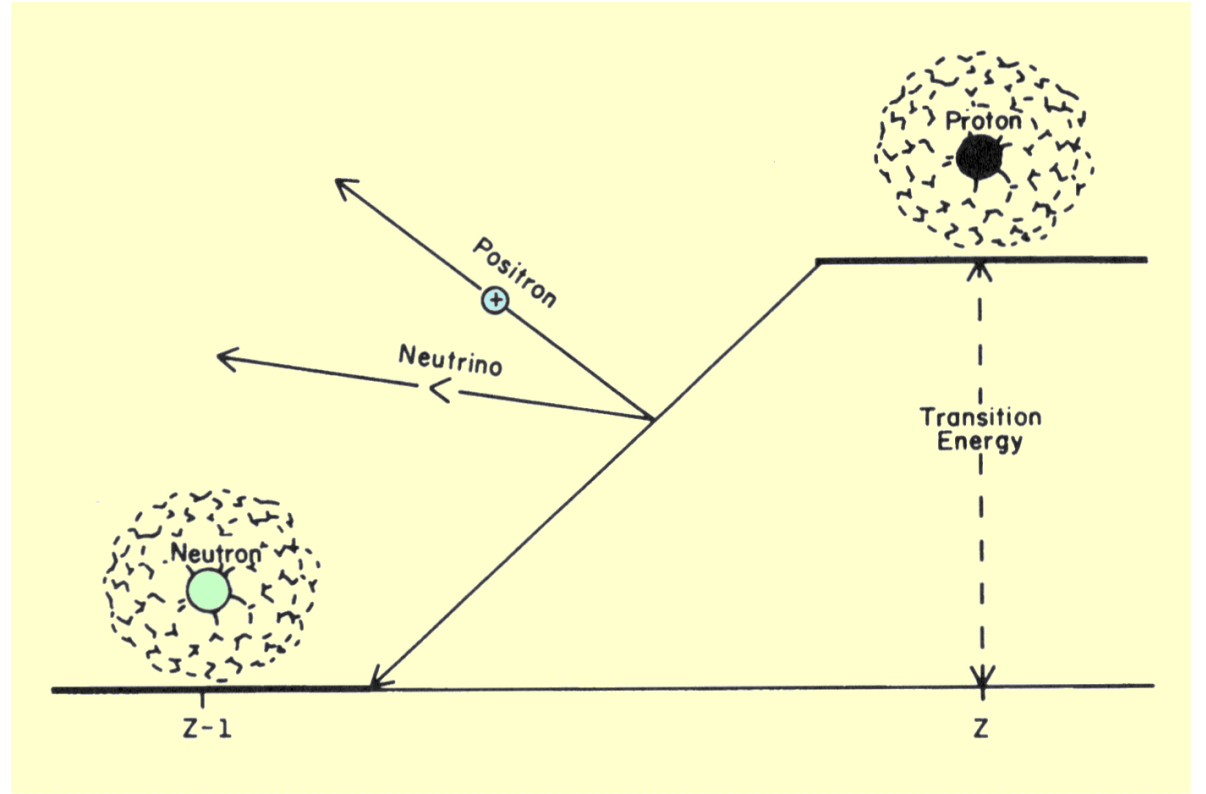
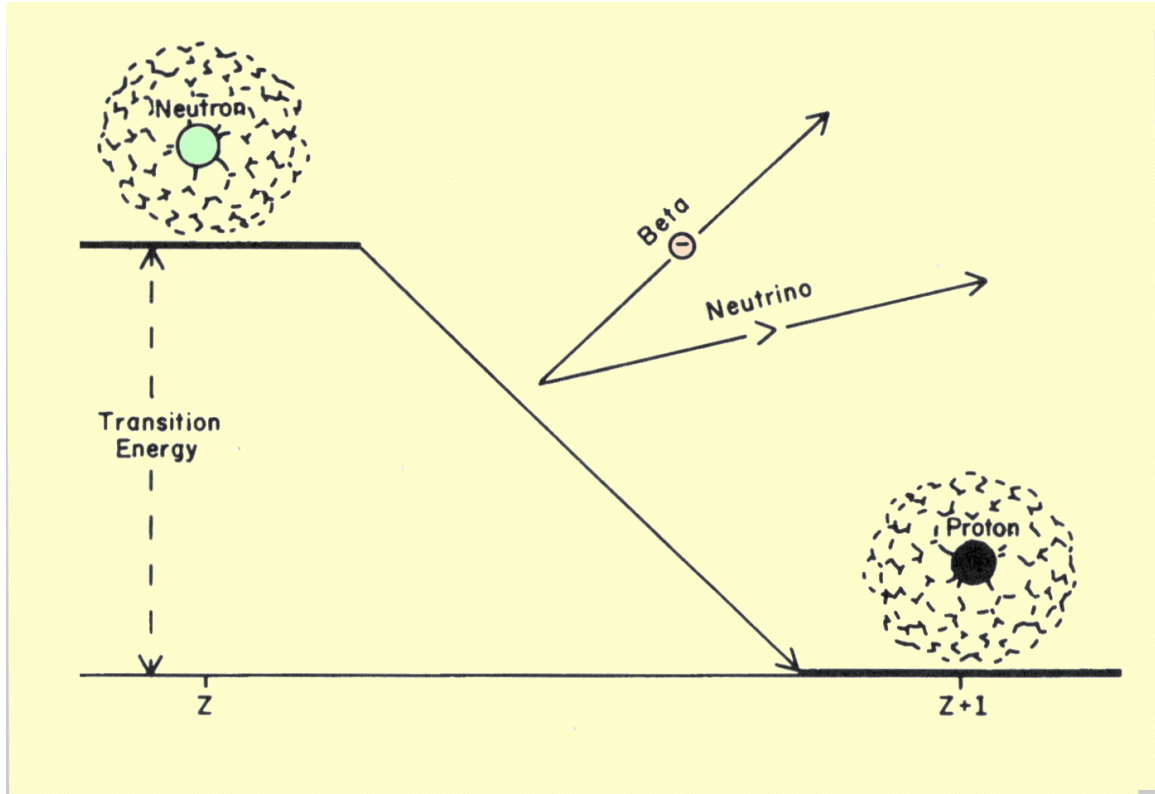
vlnových délkách, řádově $10^{-11} - 10^{-13}$ m

➤ vzniká v jádrech některých radioaktivních prvků

➤ zpravidla **doprovází** záření α i záření β

➤ některé prvky vysílají **monofrekvenční** záření jediné vlnové délky, jiné prvky (Bi, Th, Ac) vysílají celé spektrum záření γ **složené z jednotlivých čar.**

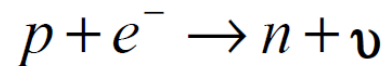




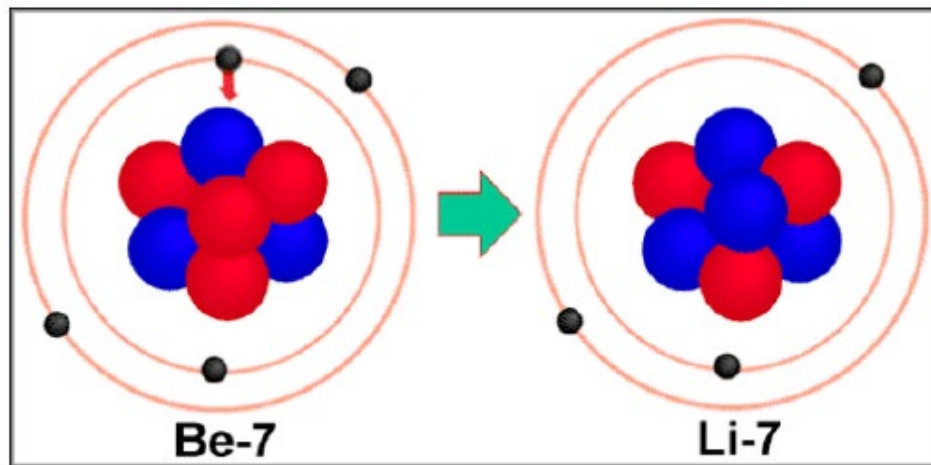
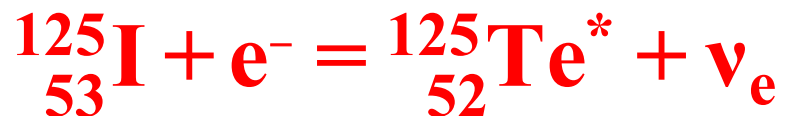
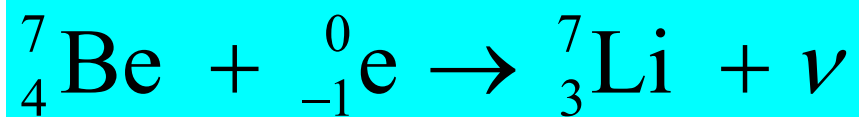
ELEKTRONOVÝ ZÁCHYT (K - ZÁCHYT)

K – zachycení

Ekvivalentní k emisi pozitronu z hlediska přeměny jádra je tzv. k- zachycení. Označuje se tak případ, kdy jádro pohltí jeden elektron z vnitřních slupek svého obalu (nejčastěji z K-slupky, z čehož plyne název jevu). Proton jádra se spojí se zachyceným elektronem a přemění se v neutron. Přeměnu doprovází emise neutrina. Rovnice přeměny je:



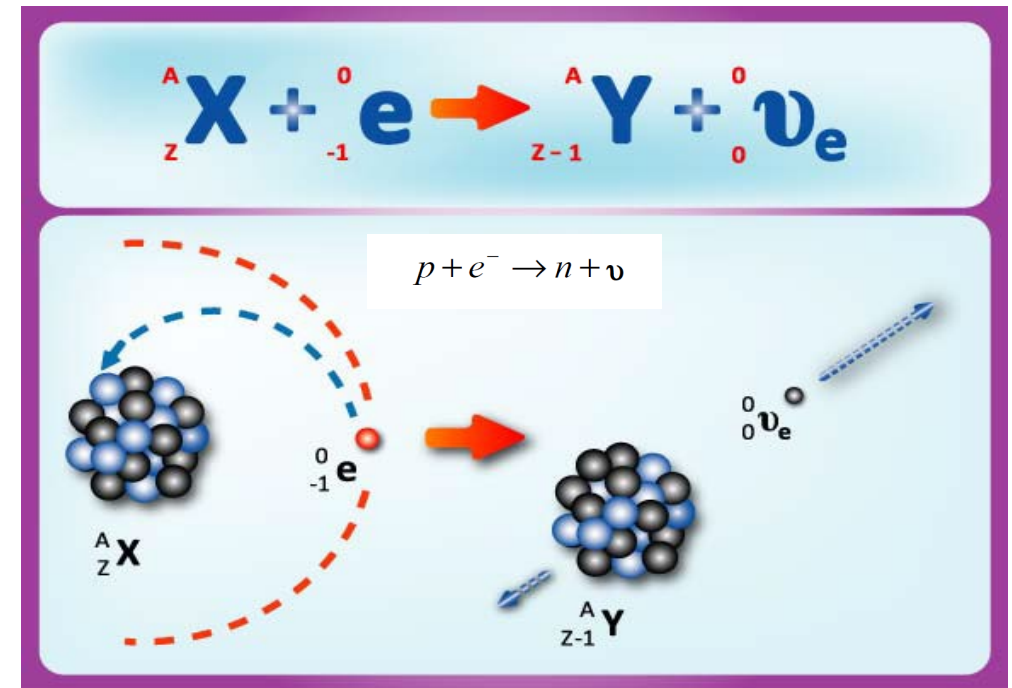
počet nukleonů se nezmění, avšak náboj jádra se sníží o jeden, jádro typu ${}^A_Z X$ se přemění na jádro ${}^A_{Z-1} Y$, což odpovídá posunutí v Mendělejevově tabulce prvků o jedno místo vlevo. K-zachycení je tedy ekvivalentní záření β^{+} .



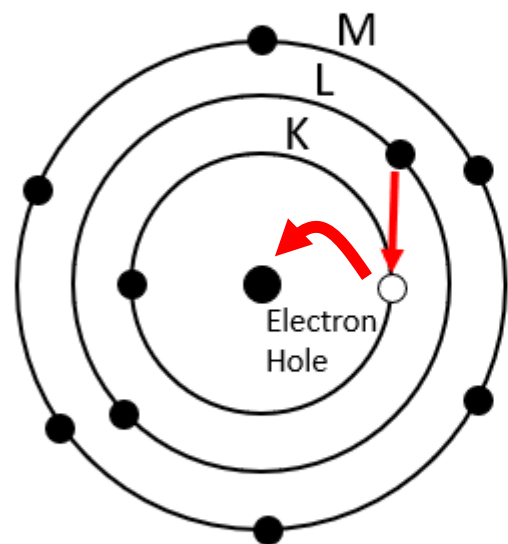
ELEKTRONOVÝ ZÁCHYT (K - ZÁCHYT)

- při porušení stability jádra (obsahuje-li o jeden proton více)
 - **jádro absorbuje nejbližší elektron** (z vnitřní slupky K)
 - e^- „se sloučí“ s p^+ v jádře a p^+ se přemění na n^0 za **emise neutrina**
 - na prázdné místo K – orbitu přejde **elektron z vyšší hladiny**
 - dojde k **vyzáření energie (fotonu)**
 - *nezmění se hmotnostní číslo, změní se protonové číslo prvku*
- Elektronový záchyt je jediným druhem radioaktivní přeměny jádra, na kterém **se podílí i elektronový obal atomu**
 - Z toho plyne i určitá **možnost porušení dogmatu o neovlivnitelnosti $T_{1/2}$** – chemický stav atomu zde $T_{1/2}$ nepatrně mění

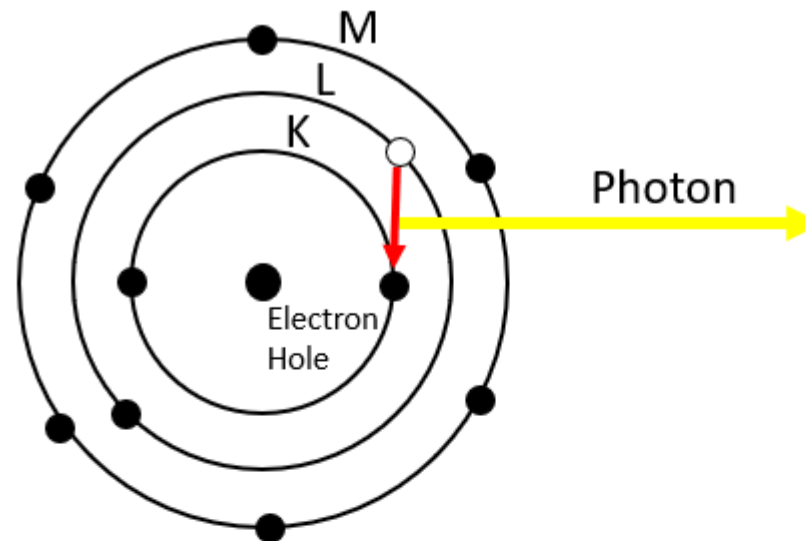
$$M(A, Z) + m_e > M(A, Z-1)$$



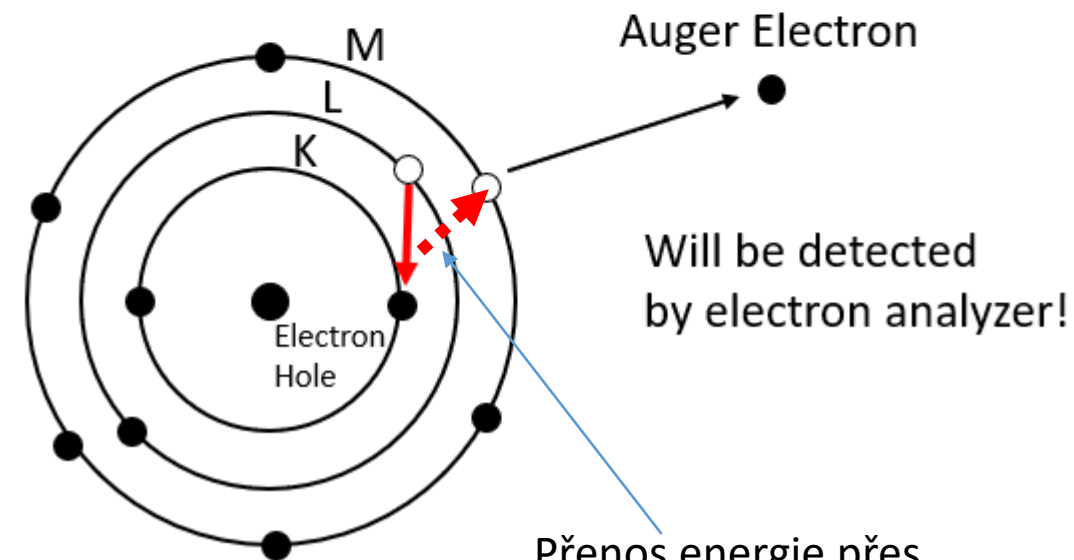
ELEKTRONOVÝ ZÁCHYT (K - ZÁCHYT)



X-ray
Fluorescence



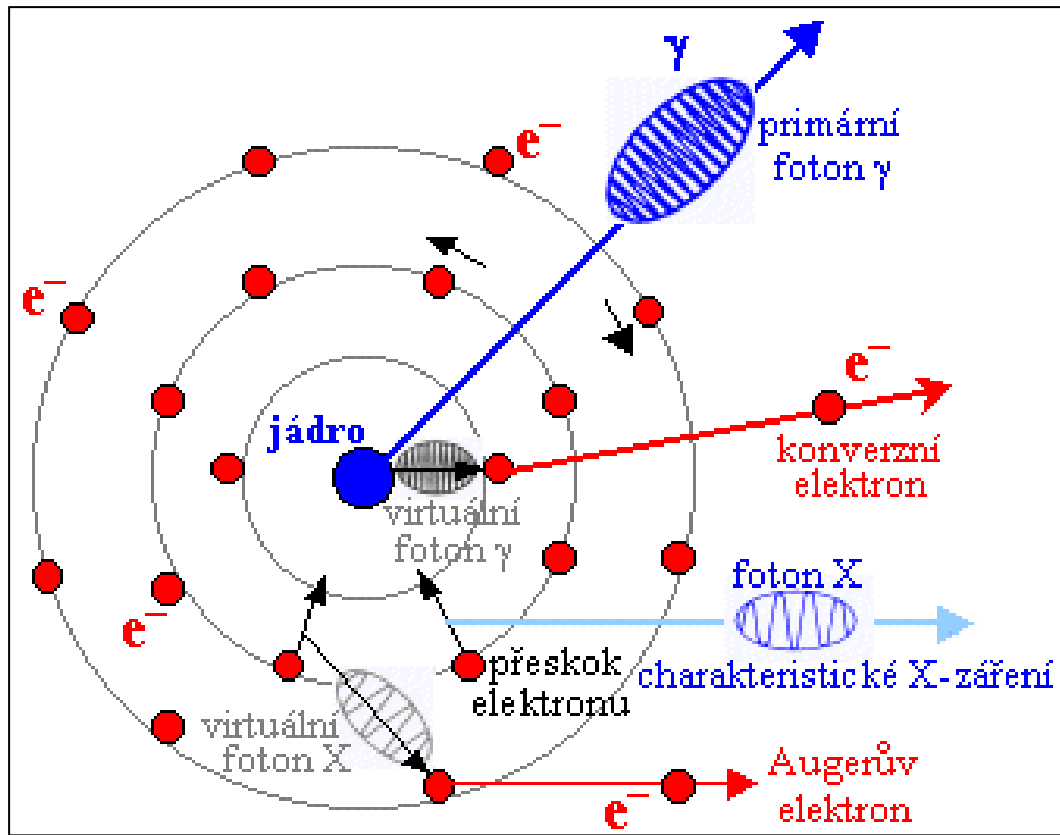
Auger Electron
Emission



Při EZ pozorujeme současně vznik:
charakteristického rentgenova záření
a **Augerových elektronů** (vznikají při průchodu
rtg záření vyššími elektronovými slupkami
⇒ **mají diskrétní energii.**

Přenos energie přes
vyzářený virtuální
foton

Will be detected
by electron analyzer!



VNITŘNÍ KONVERZE

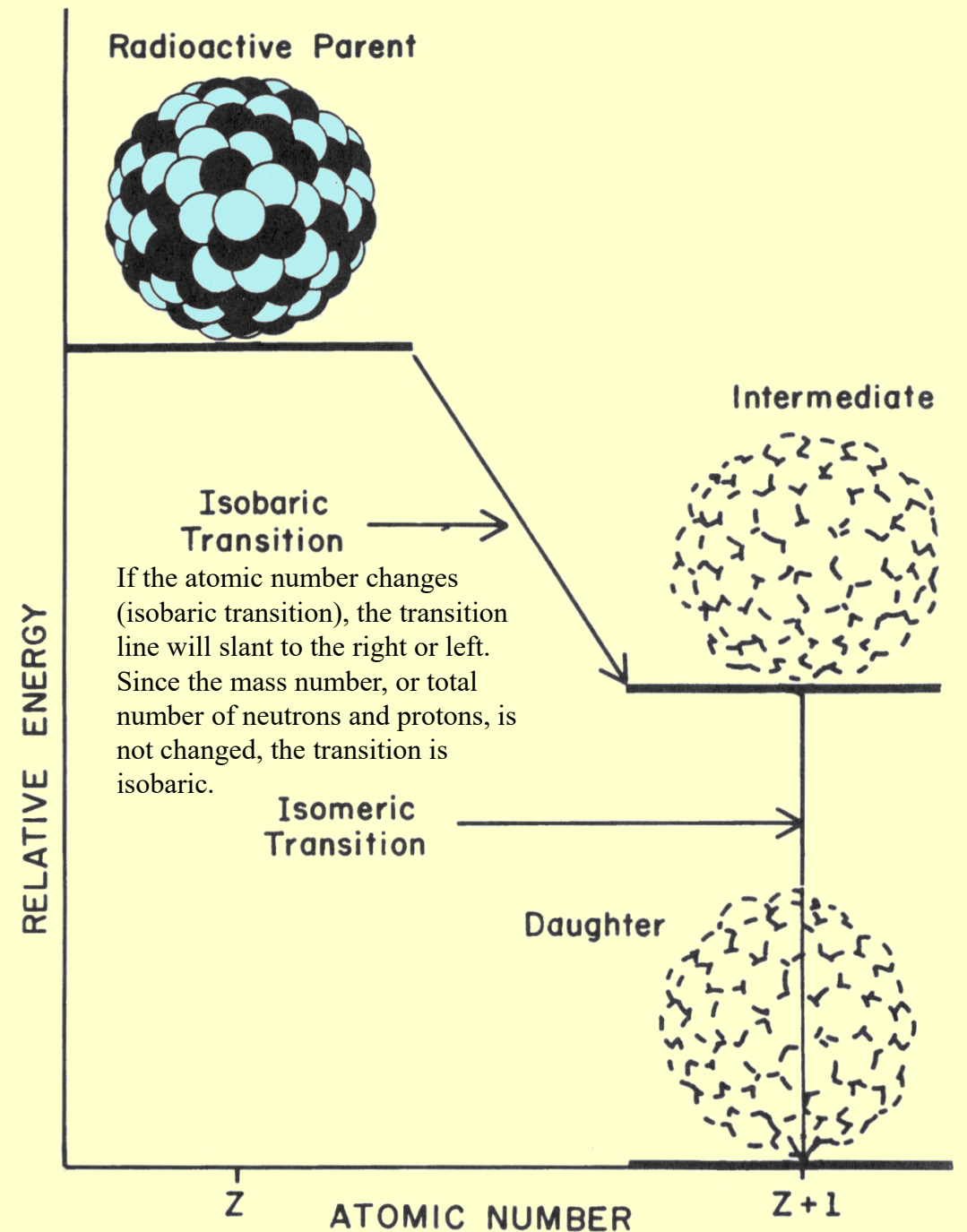
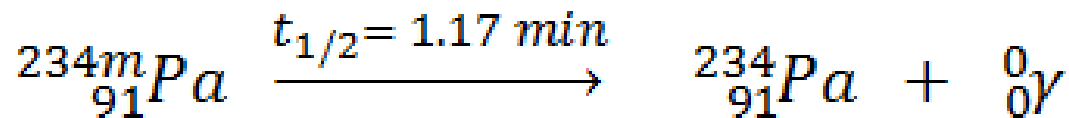
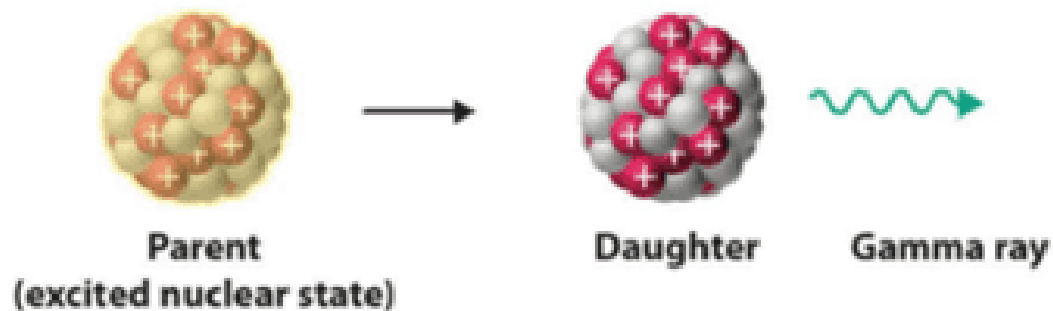
- je alternativním způsobem deexcitace jádra (nezářivý přenos energie na orbitální elektron)
- proces je umožněn překryvem vlnových funkcí orbitálního elektronu a excitovaného jádra

uvolňuj se tzv. **konvertovaný elektron** (má diskrétní energii)

- po uvolnění **konvertovaného elektronu** se vakance v elektronovém orbitalu zaplňuje elektronem z vyšší hladiny a dochází ke **vzniku charakteristického rtg. záření**, příp. i **Augerova elektronu** (jako u EZ)
- **Konverzní koeficient** = je relativní pravděpodobnost vnitřní konverze vůči rozpadu, roste s E_γ (energie záření γ) a se Z jádra.

IZOMERNÍ PŘECHOD

- jádro přechází ze stavu o **vyšší energii na nižší úroveň**
- přebytek energie je vyzářen v podobě **záření γ**
- **hmotnost ani protonové číslo se nemění**



Další typy přechodů

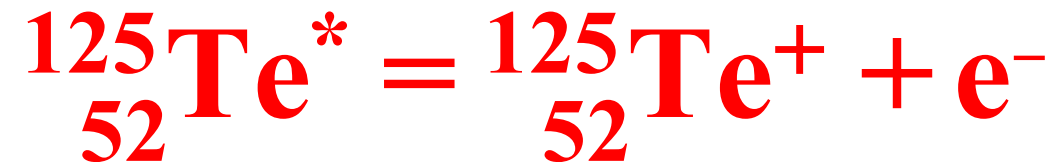
obecně

Prvek uvolní energii nabuzeného stavu **emisí vnitřního elektronu**

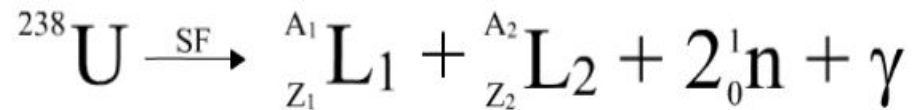
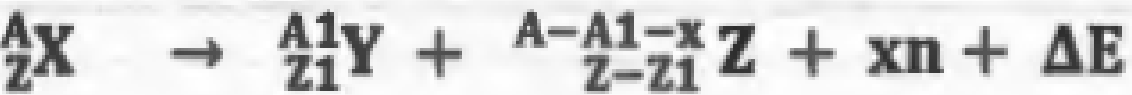
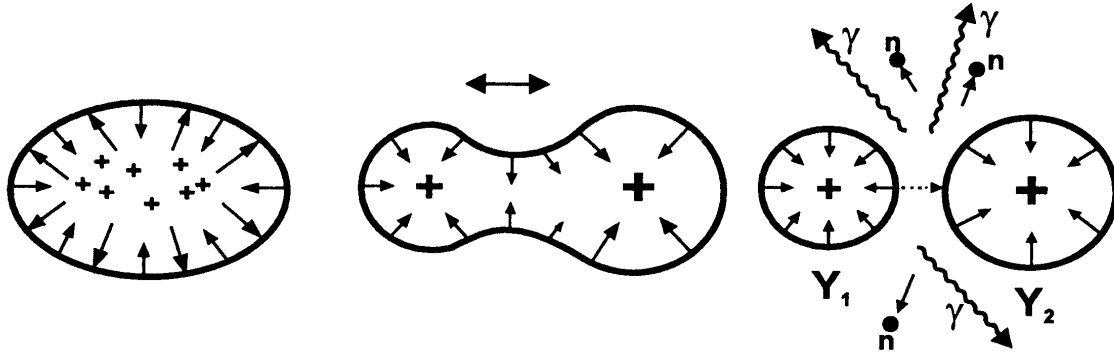


Vnitřní konverse

Tellur z nabuzeného stavu přejde do jedenkrát ionizovaného stavu při emisi elektronu



SAMOVOLNÉ ŠTĚPENÍ



X je samovolně se rozpadající jádro,
Y,Z jsou dvě těžká jádra,
xn je x uvolněných neutronů,
ΔE je uvolněná energie.

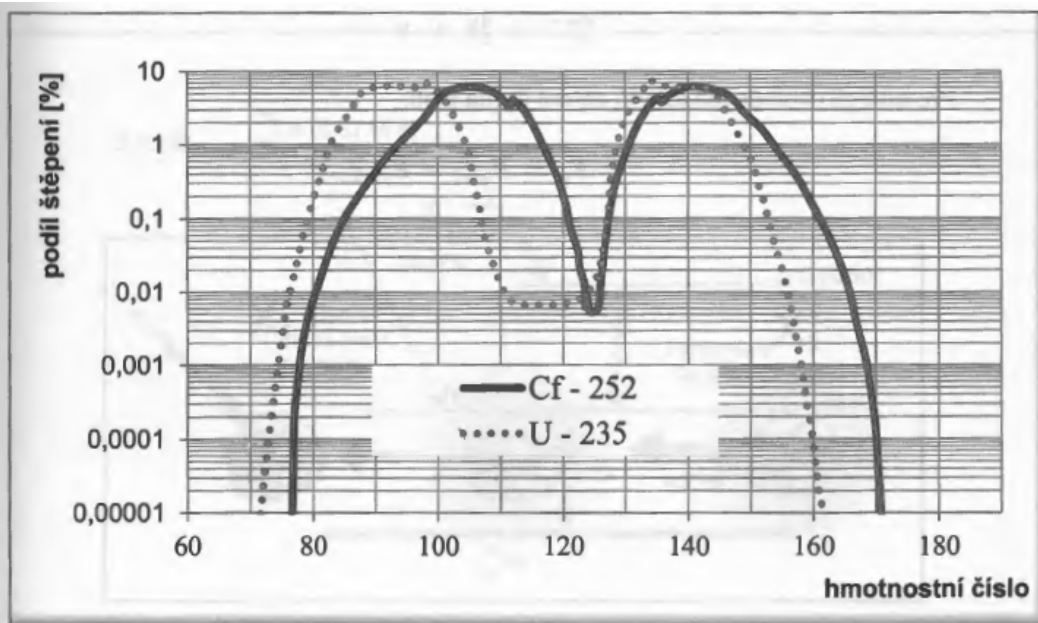
SF (Spontaneous Fission) se vyskytuje u jader:

- s vysokým počtem protonů
- s elipsoidním tvarem jádra
- musí platit hmotnostní podmínka
- vznikají přitom **2 tzv. trosky a zpravidla 2-3 neutrony**
- jde zpravidla o konkurenční reakci k procesu α

SAMOVOLNÉ ŠTĚPENÍ

- Zavádí se tzv. **parametr štěpení Z^2/A**
- vychází z kapkového modelu jádra – jde o poměr energie odpuzování a energie povrchové

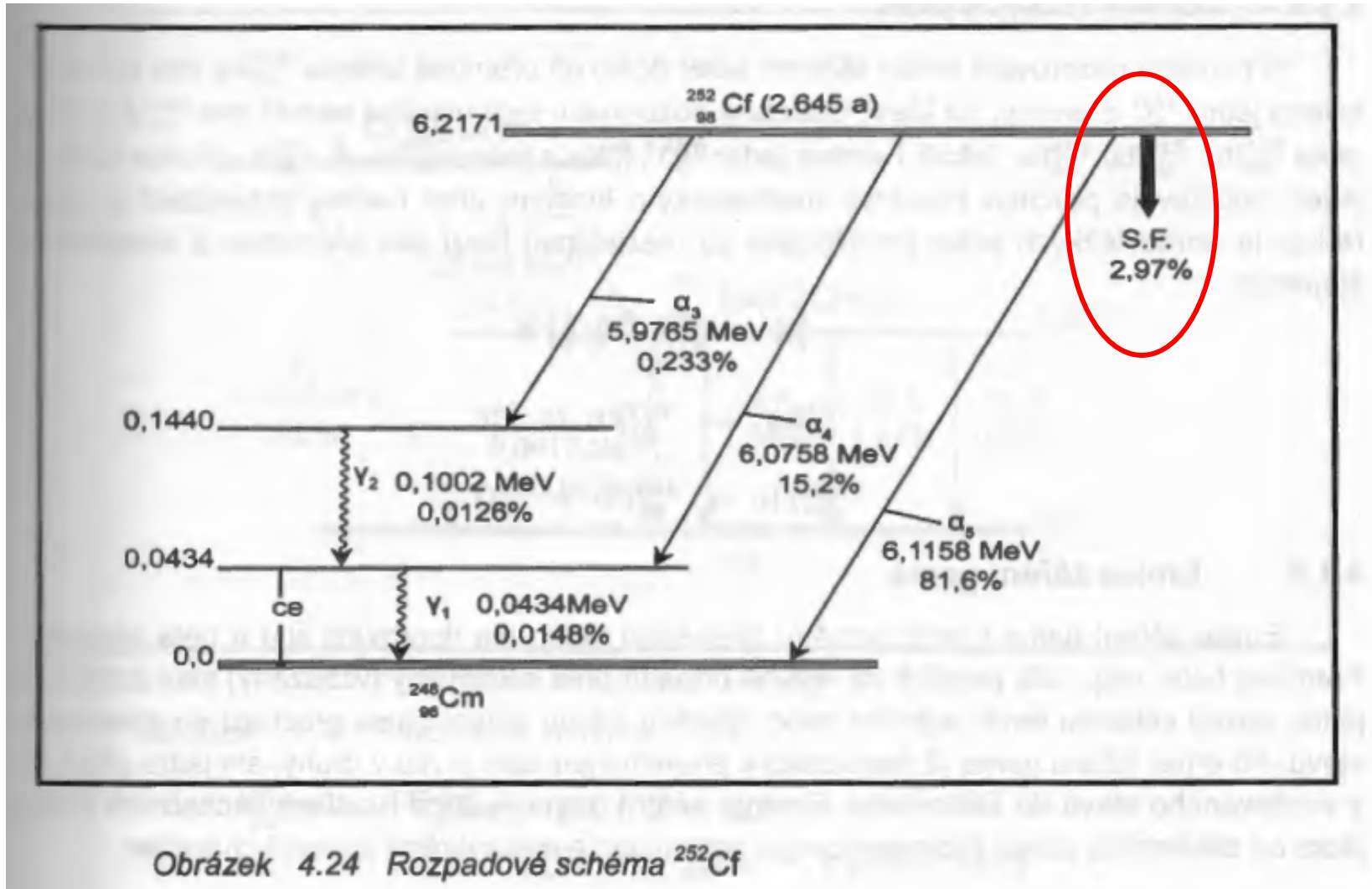
S rostoucím parametrem štěpení klesá poločas rozpadu samovolného štěpení nuklidu:



Obrázek 4.25 Rozdělení hmotnostních čísel při štěpení ^{252}Cf a ^{235}U

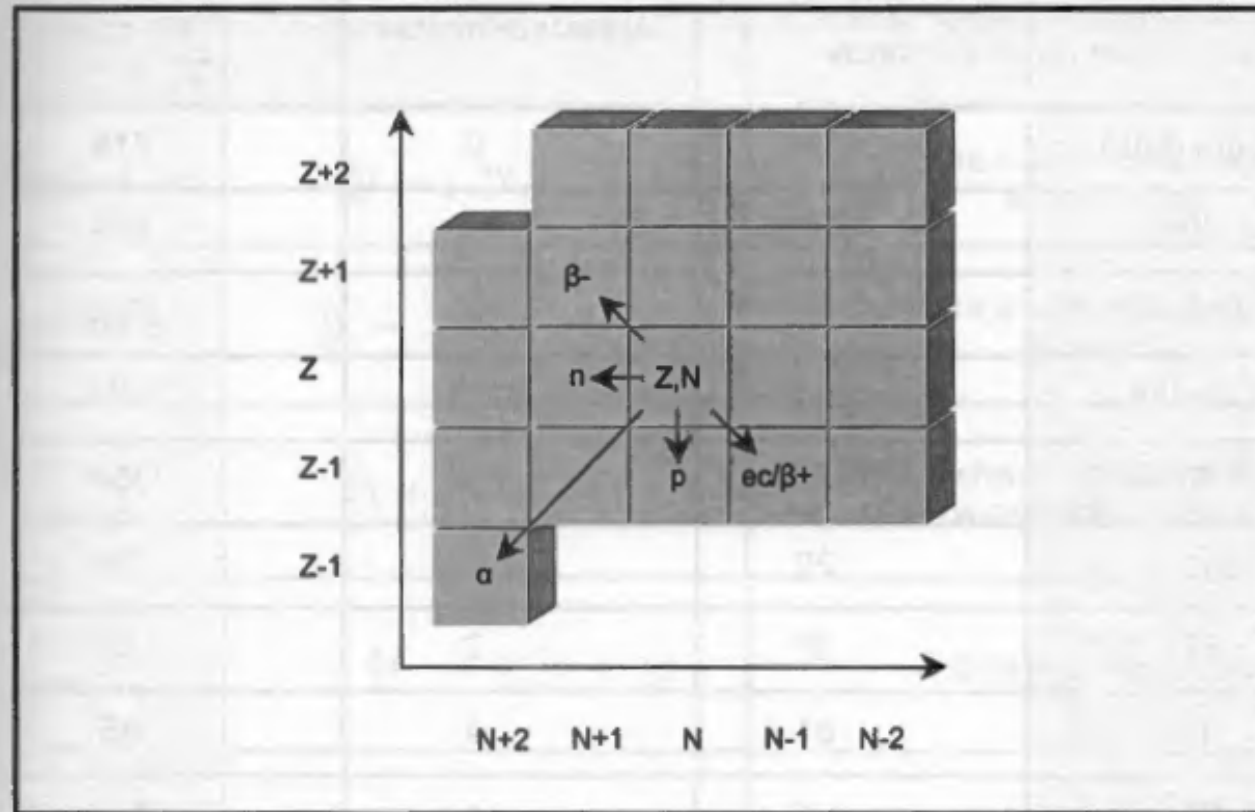
nuklid	Z^2/A	poločas (roků)
$^{238}_{92}\text{U}$	35,56	$1,0 \cdot 10^{16}$
$^{240}_{94}\text{Pu}$	36,82	$1,2 \cdot 10^{11}$
$^{244}_{96}\text{Cm}$	37,77	$1,4 \cdot 10^7$
$^{252}_{98}\text{Cf}$	38,11	66
$^{254}_{100}\text{Fm}$	39,37	0,67

SAMOVOLNÉ ŠTĚPENÍ



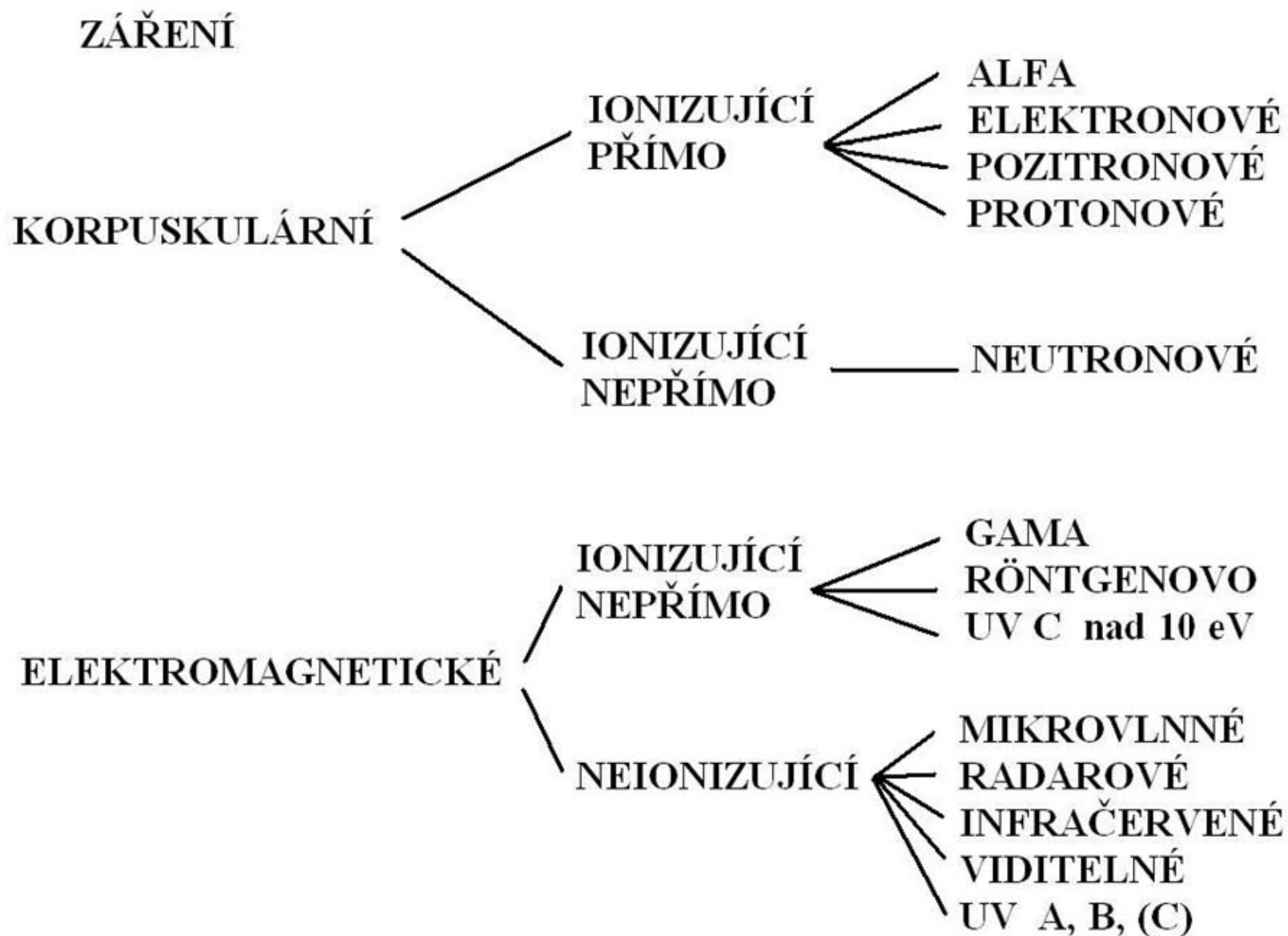
Fajans-Soddyho posunová pravidla

V současné době rozlišujeme osm základních radioaktivních přeměn, při kterých dochází ke změně protonového nebo nukleonového čísla.



Obrázek 4.3 Základní radioaktivní přeměny

TYPY IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ A JEHO INTERAKCE

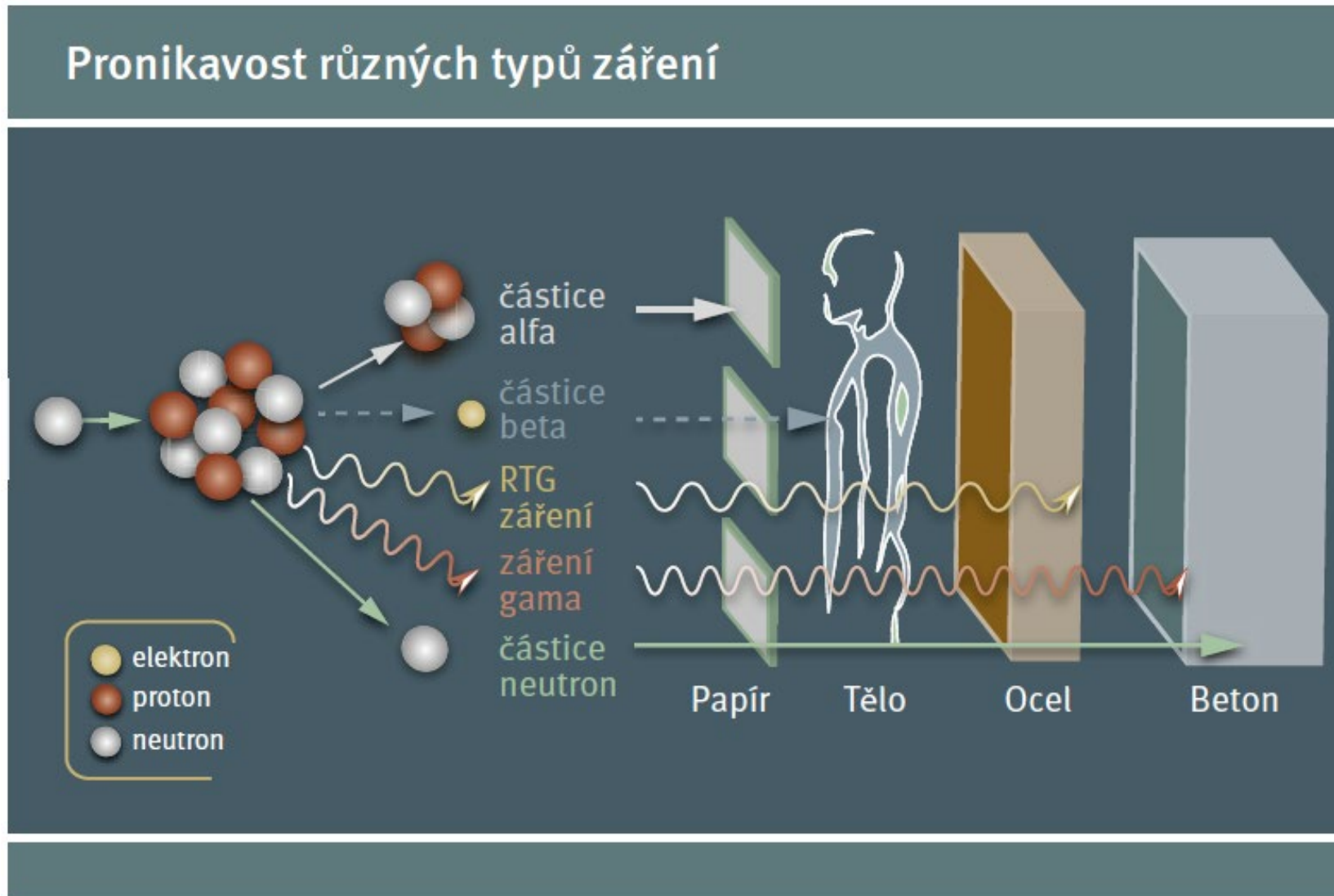


Interakce ionizujícího záření s hmotou a biologickými systémy

vysvětlení základních procesů v neživé a živé hmotě,
které jsou vyvolány interakcí s ionizujícím zářením (IZ)



PRONIKAVOST IZ



ROZDÍLNÉ VLASTNOSTI ZÁŘENÍ VZTAHU K LET – **KLIDOVÁ HMOTNOST A NÁBOJ**

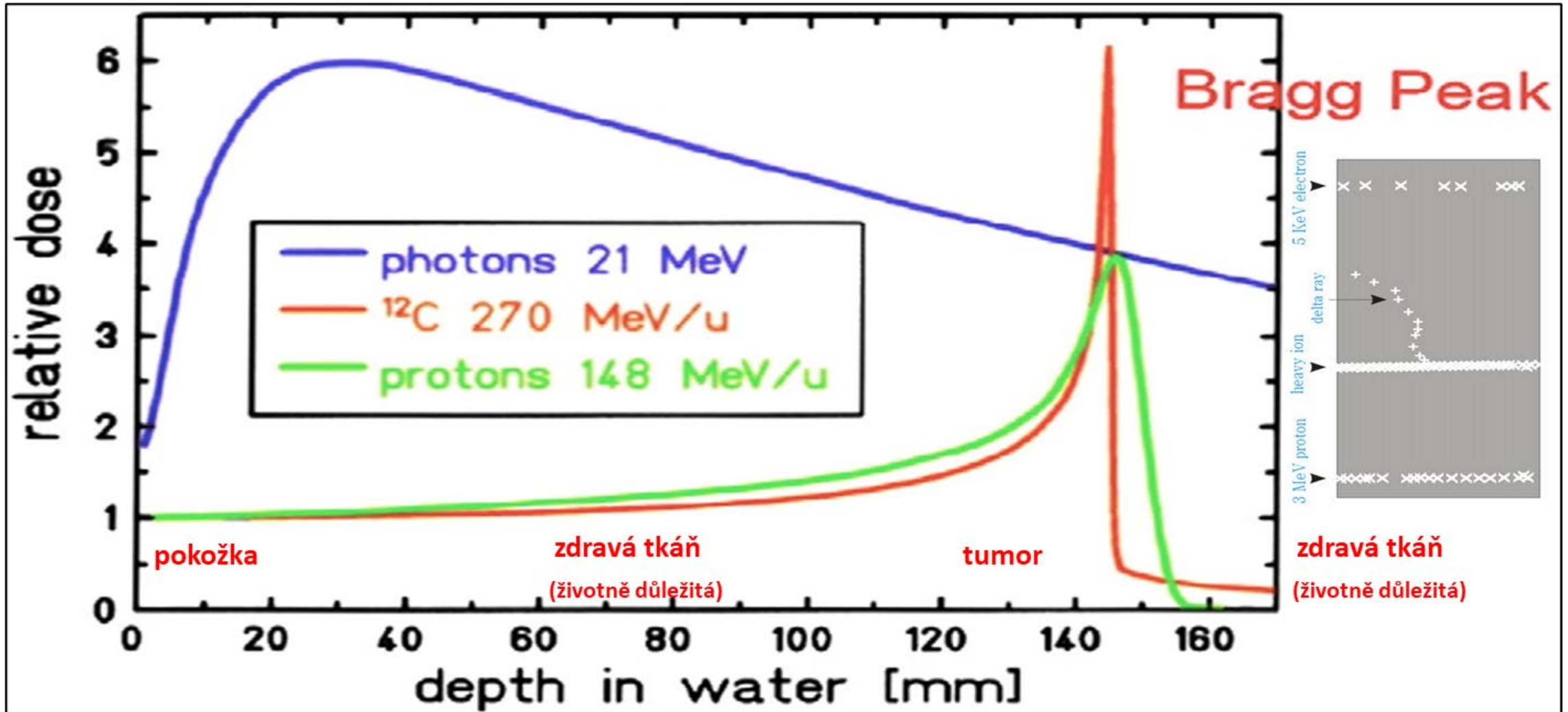
fotonové záření

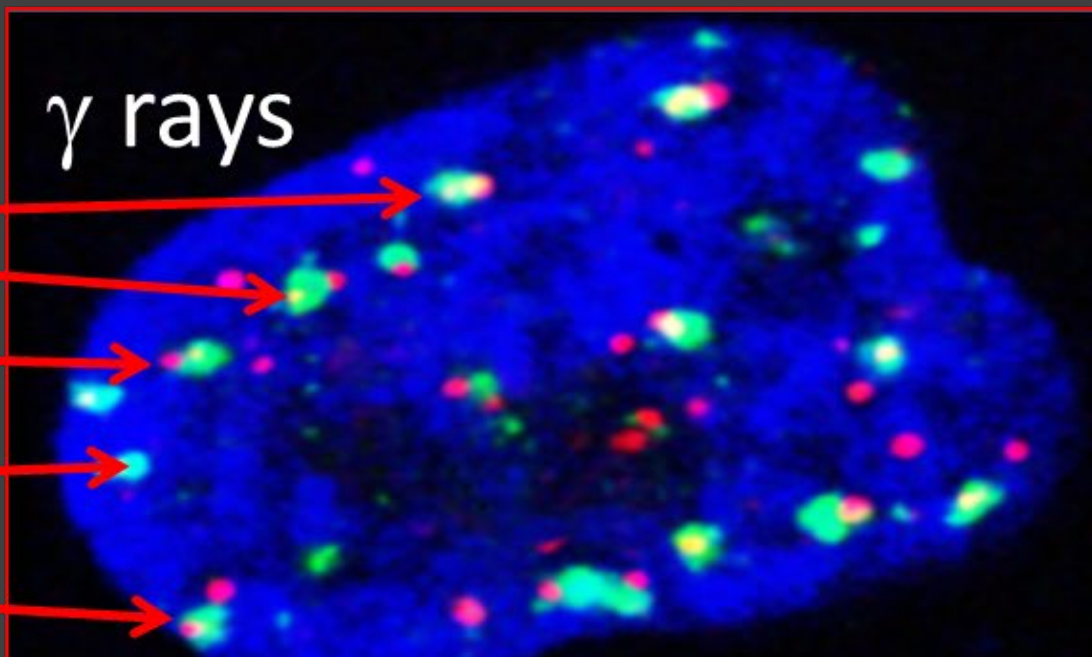
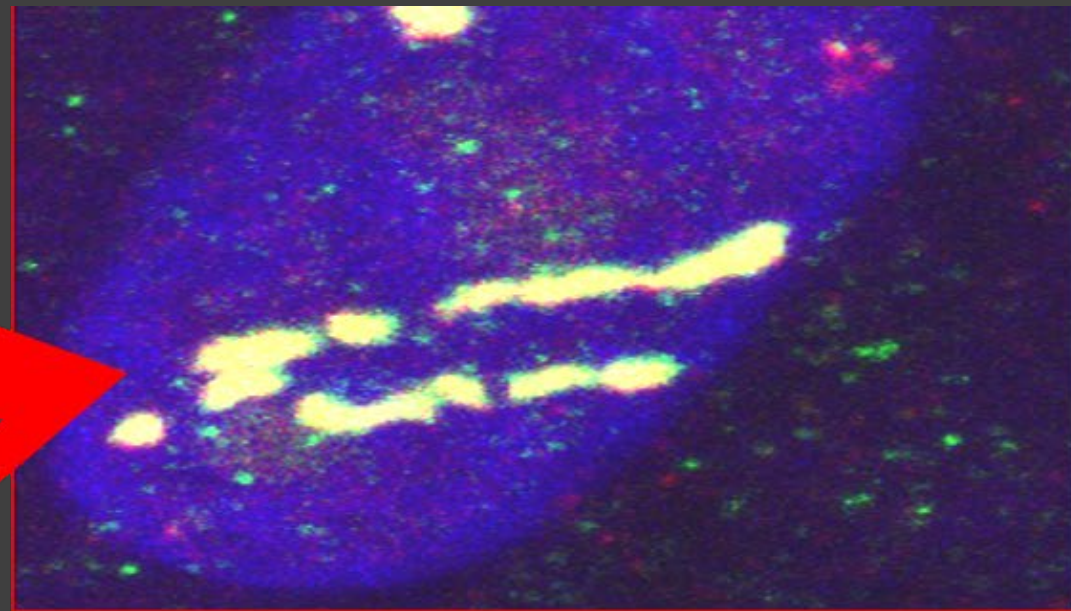
VS

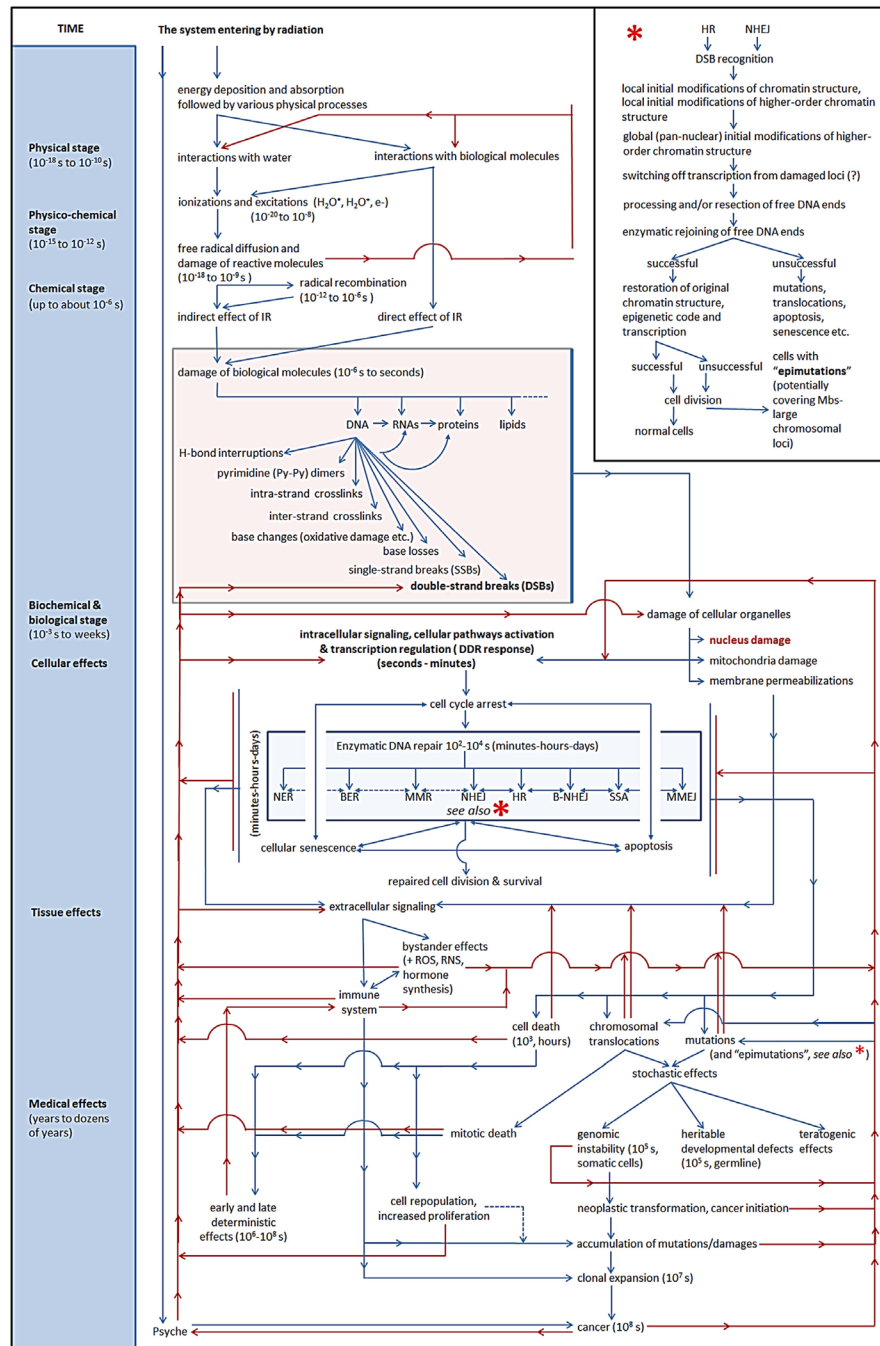
nabité částice



ENERGY DEPOSITION – DIFFERENT TYPES OF RADIATION







• Absorbce IZ vyvolává v živých systémech procesy, které jsou charakteristické

- svou komplexností
- extrémním časovým rozpětím (od attosekund [10⁻¹⁸] po několik desetiletí)

• Pro lepší porozumění můžeme rozlišit několik fází (obr. vlevo):

- Fyzikální
- Fyzikálně-chemickou
- Chemickou / biochemickou
- Biologickou
- Medicínskou

• rozhraní těchto fází jsou však neostré a v literatuře panují značné rozdíly zejména s ohledem na dobu jejich trvání

• Nejprve IZ interaguje s biologickými systémy řadou fyzikálních pochodů, které se nijak neliší od interakcí záření s neživou hmotou (viz dále)

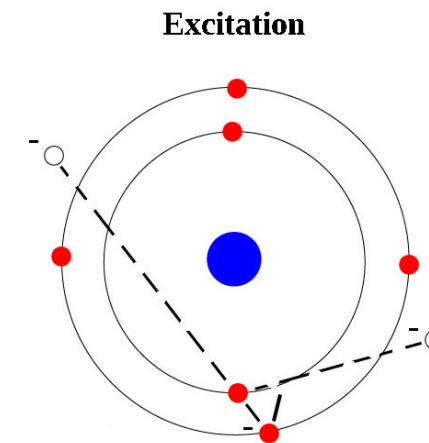
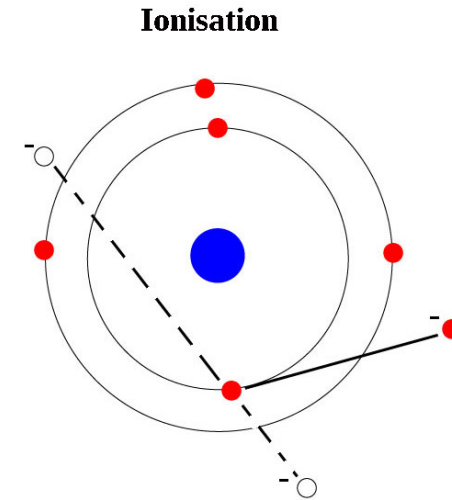
• Totéž lze v principu říci i o chemické fázi, do interakcí však vstupují i biomolekuly specifické pro živé systémy



Interakce IZ s hmotou

- Absorbce IZ vede k postupnému předání energie záření hmotě, což vyvolá v ozářené látce nejprve procesy

- **Fyzikální** (ihned po ozáření)
- Fyzikální fáze je obdobím, kdy atomy a molekuly biologického systému absorbují energii záření.
- Při interakci kvanta ionizujícího záření s hmotou je energie záření předávána elektronům v atomech,
- primární záření a následně i elektrony vyražené z atomů primárním zářením ionizují a excitují velké množství dalších atomů.
- čímž se rozvíjí kaskády ionizací a excitací.



VYSOKÁ ÚČINNOST IZ

- Za zmínku stojí, že ve srovnání s jinými formami energie je energie ionizujícího záření nezbytná k poškození či dokonce usmrcení člověka relativně velmi malá
- Například při celotělové expozici **10 Gy (10 J.kg⁻¹)** záření gama, tj. dávce, která již vyvolá smrtelnou formou nemoci z ozáření (**LD₅₀ ~ 4 Gy**), předá záření člověku o hmotnosti 80 kg pouze **800 J**.
- Přestože tato dávka 10 Gy zvýší tělesnou teplotu člověka pouze o **0,002 °C**, je **schopna vyvolat smrt**.
- Přitom třeba k ohřátí 1 l vody o 1 °C potřebujeme 4180 J, tj. energii více než 4x větší.

γ IZ: LD₅₀ ~ 4 Gy



IZ: 10 Gy (10 J.kg⁻¹)
100% úmrtnost
 $\Delta T = 0,002 \text{ °C}$



versus

X



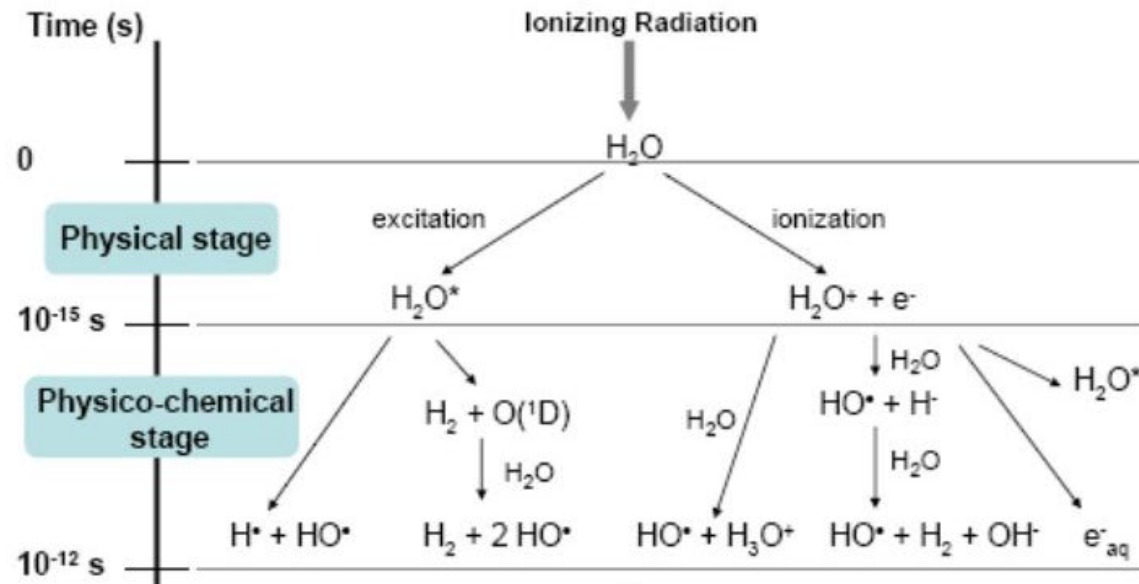
Tepelný ohřev:
V=1 litr H₂O
 $\Delta T = 1 \text{ °C}$
→ 4180 J
(tzn. 4x více)



Interakce IZ s hmotou

- **Fyzikálně-chemické** (zlomky sekund po ozáření; 10^{-14} až 10^{-10} s)
- Během tohoto stádia se rozvíjí sekundární fyzikálně-chemické procesy – **interakce vytvořených iontů s molekulami**, při nichž dochází k **disociaci molekul** a **vzniku dalších reaktivních iontů a volných radikálů**
- **radiolýzou vody H_2O** (nejčastější molekula v těle, viz dále) např. vznikají vodíkové kationty H^+ a hydroxylové anionty OH^- , radikály H^\bullet , OH^\bullet → **NEPŘÍMÝ ÚČINEK IZ**
- I tento proces je velmi rychlý, netrvá déle než 10^{-14} - 10^{-10} sec.

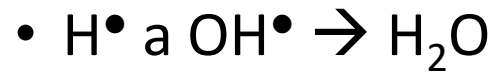
Water radiolysis : detailed mechanisms



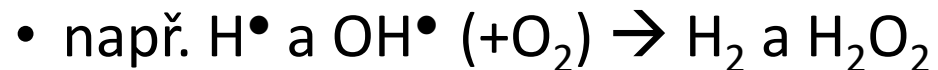
Interakce IZ s (živou) hmotou

- **CHEMICKÉ STÁDIUM**

- Vzájemnou rekombinací vytvořených radikálů některé z nich zanikají, a přestávají tak být pro biomolekuly nebezpečné; například vzniká opět voda



- Zbývající radikály mezi sebou též reagují za vzniku dalších více či méně reaktivních molekul

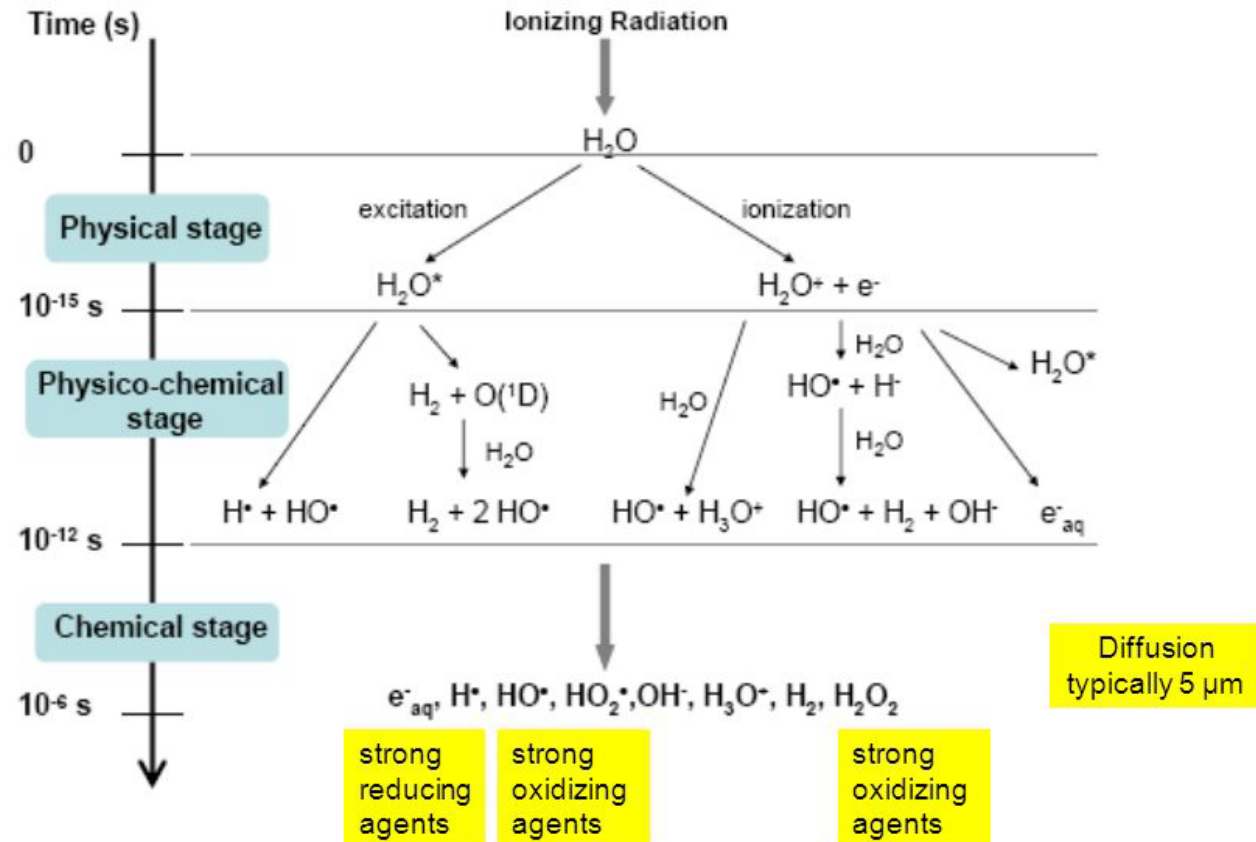


- **Radikály a další reaktivní molekuly zároveň napadají další a další molekuly ve svém okolí**



Fyzikální až chemické stádium interakce IZ s hmotou

Water radiolysis : detailed mechanisms



Sophie Le Caër (2011) Water Radiolysis: Influence of Oxide Surfaces on H₂ Production under Ionizing Radiation. *Water* 3, 235-253



Specifika biologických systémů

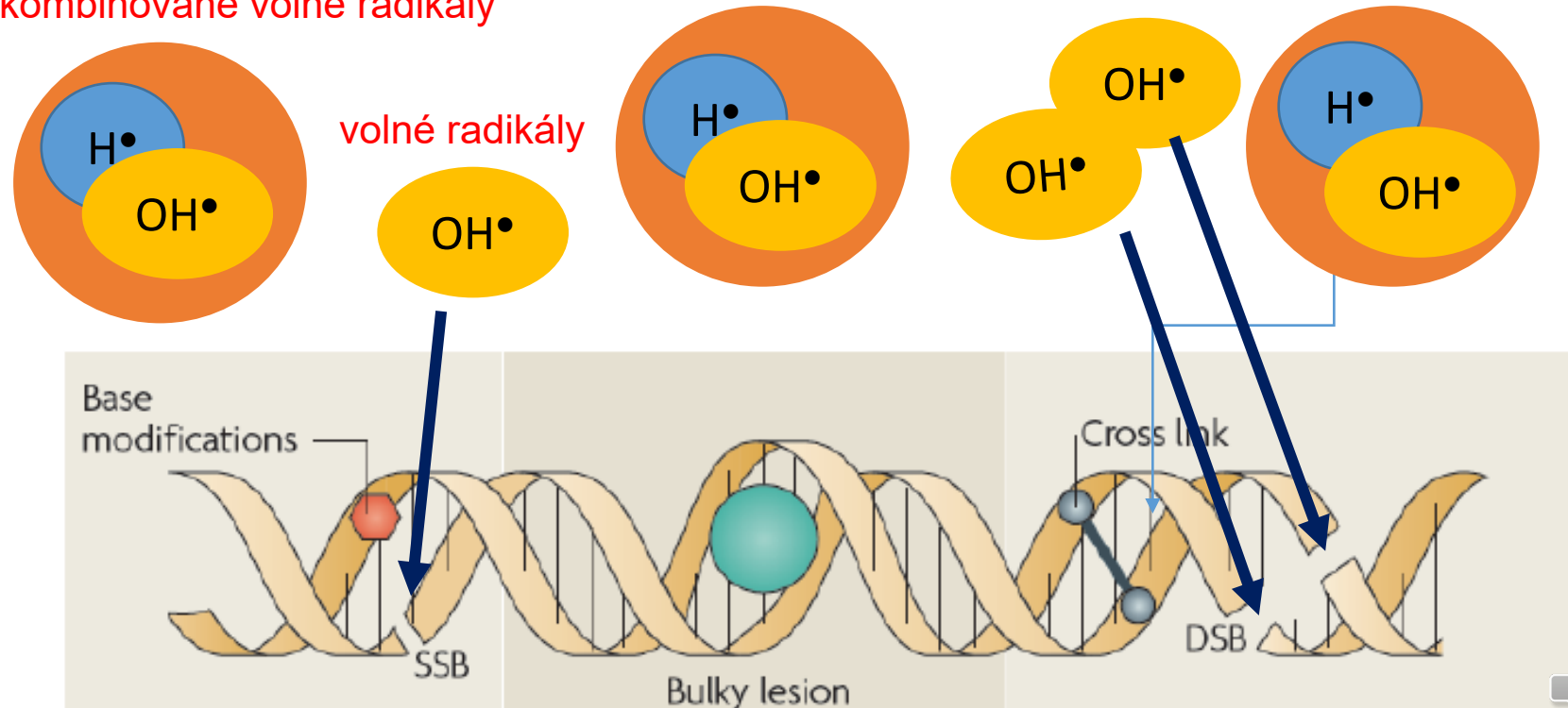
- Až do chemického stádia je interakce neživé hmoty a živých organismů s IZ principiálně stejná,
- U živých organismů však do chemických reakcí vstupují i **biomolekuly**
- K fyzikálním a chemickým procesům se proto u živých organismů následně přidávají i specifické procesy
 - chemické
 - biologické
 - eventuálně medicínské



Chemické stádium interakce IZ s hmotou – specifika biologických systémů

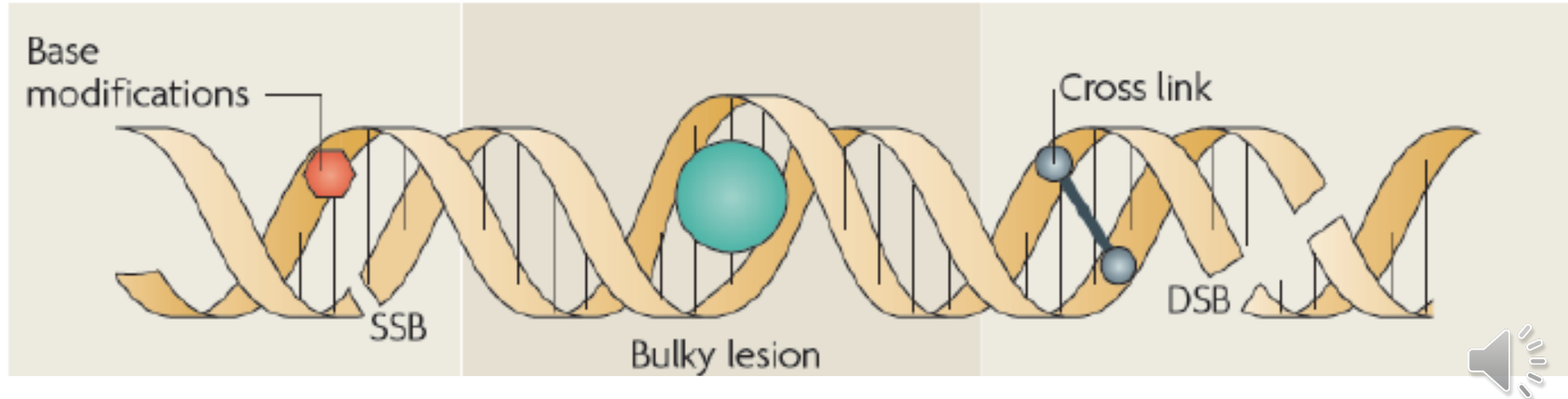
- Nezrekombinované ionty, radikály, excitované atomy a další produkty reagují s biologicky důležitými organickými molekulami
- "atakují" DNA, RNA, enzymy, strukturní proteiny, lipidy membrán přičemž často mění složení a funkci těchto molekul.

zrekombinované volné radikály



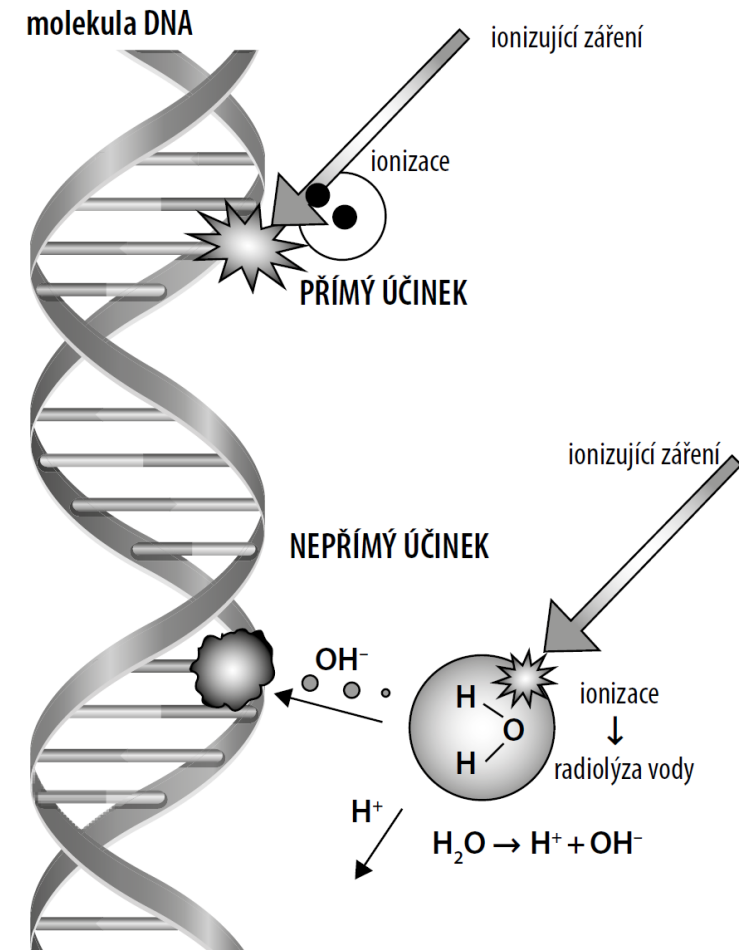
POŠKOZENÍ DNA – prvotní nastínění problému

- Typickou poruchou na molekulární úrovni jsou **zlomy vlákn v molekule DNA**
 - buď zlom jen jednoho vlákna (**SSB**, single strand break),
 - nebo úplný zlom dvojvlákna DNA (**DSB**, double strand break) → nejzávažnější poškození DNA
- Dále mohou vznikat atypické vazbové "můstky" uvnitř dvouvlákna DNA a mnohé další chemické změny cukr-fosfátové páteře DNA i jednotlivých bazí (problematice poškození DNA bude věnována samostatná přednáška).

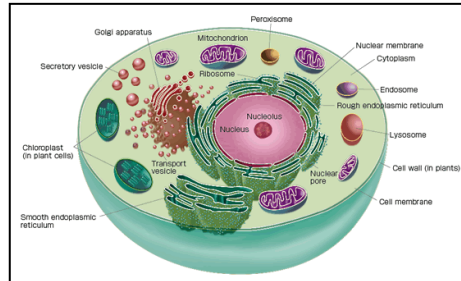


Chemické stádium interakce IZ s hmotou – specifika biologických systémů

- Jednotlivé procesy chemického stádia trvají různě dlouhou dobu - od tisícín sekundy do řádově jednotek sekundy, v závislosti na transportní době reaktivních složek z místa svého vzniku do místa lokalizace napadené biomolekuly.
- Zlomy v DNA mohou ale vznikat i přímo následkem fyzikální interakce IZ nebo sekundárních (delta) elektronů (viz později) s DNA, nejen tedy následkem chemického poškození

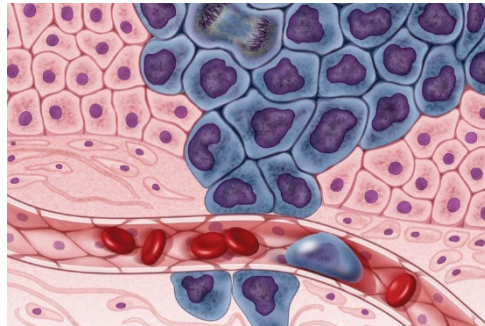


Interakce IZ s živou hmotou BIOLOGICKÉ PROCESY



Změny na úrovni buněk

Molekulární změny v biologicky důležitých látkách (DNA, enzymech, proteinech) mohou vyústit v **morfologické a funkční změny** v buňkách a orgánech, a následně i organismu jako celku.



Změny na úrovni tkání, orgánů a orgánových soustav



Medicínské manifestace na úrovni celého organismu

- Biologické procesy probíhají v extrémně dlouhém časovém období **desítek minut až několik desetiletí (!!)** po ozáření

Interakce IZ – biologické stádium

- Buňky v závislosti na rozsahu poškození **umírají** nebo **přežijí** a **aktivují komplexní odpověď buňky na ozáření**, zejména na poškození DNA (DDR – DNA Damage Response).
- Cílem této odpovědi je **opravit** poškozené biomolekuly a **navrátit buňku do původního stavu**,

DDR –DNA damage response

