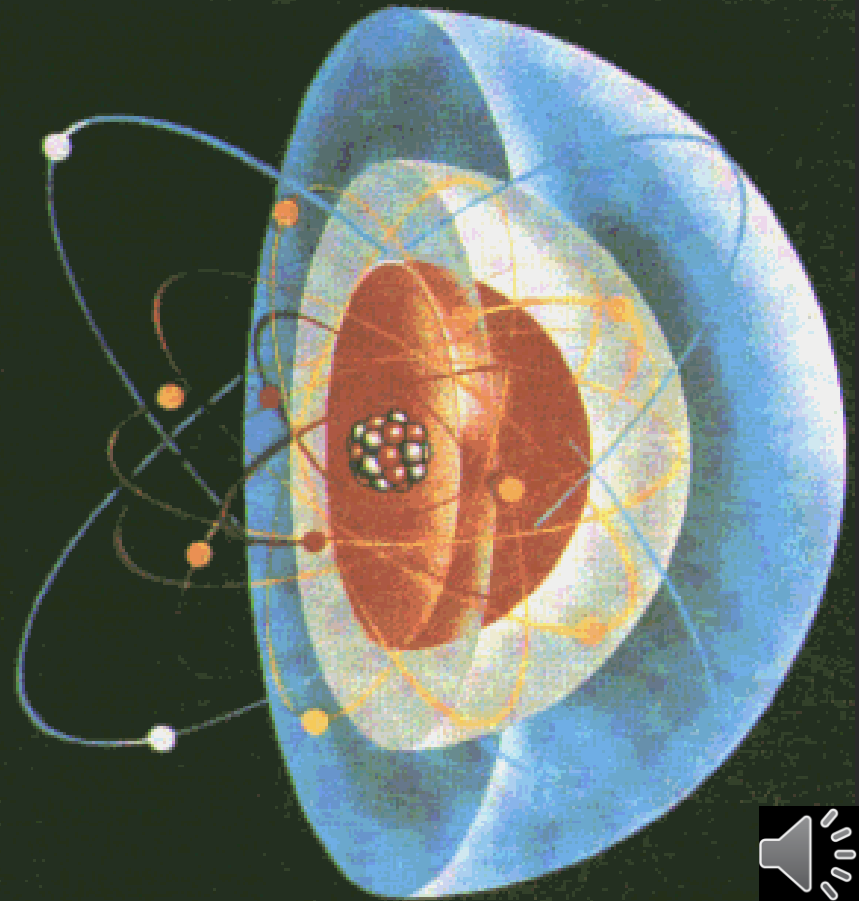


RADIAČNÍ BIOFYZIKA

Martin Falk
BFU AVCR Brno
Email: falk@ibp.cz
Tel.: 728-084060

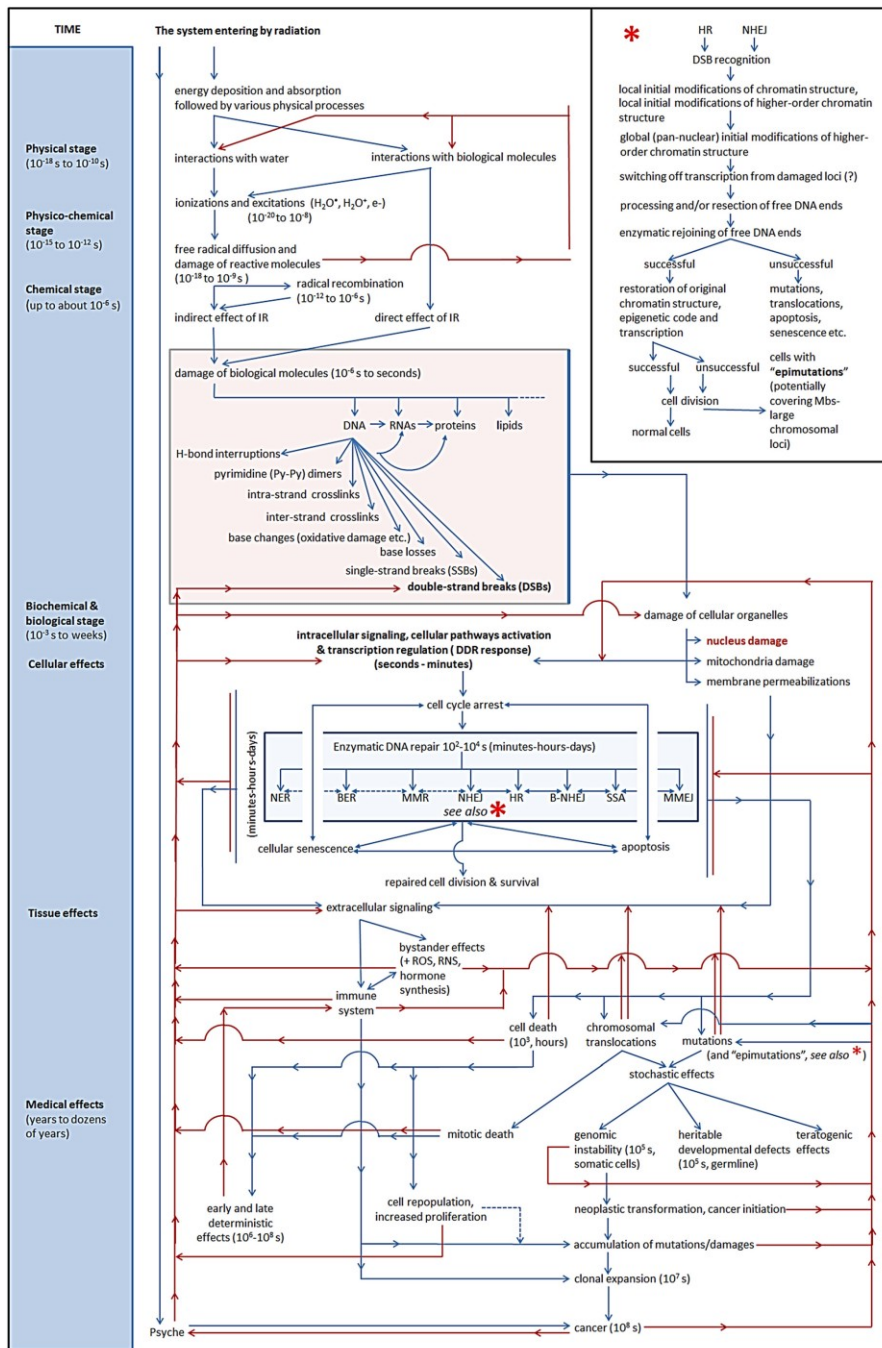


Přednáška 7.

Interakce ionizujícího záření s hmotou a biologickými systémy

- minule: nestabilita atomového jádra, radioaktivita, typy radioaktivních rozpadů
- nyní: vysvětlení základních procesů v neživé a živé hmotě, které jsou vyvolány interakcí s ionizujícím zářením (IZ)





- 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

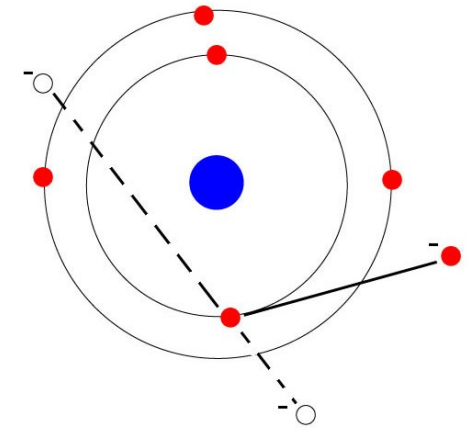


Interakce IZ s hmotou

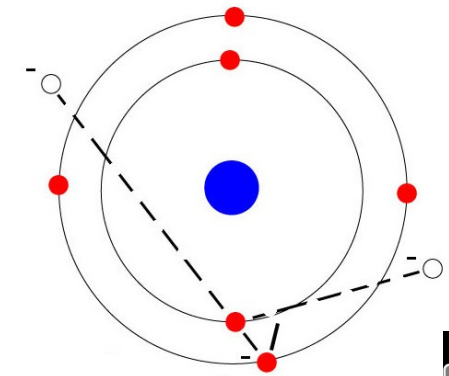
- Absorbce IZ vede k postupnému předání energie záření hmotě, což vyvolá v ozářené látce nejprve procesy

- **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.

Ionisation



Excitation



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 ($\text{LD}_{50} \sim 4 \text{ Gy}$), předá záření člověku o hmotnosti 80 kg pouze 800 J.
- Přestože tato dávka 10 zvýší tělesnou teplotu člověka pouze o $0,002 \text{ }^\circ\text{C}$, je schopna vyvolat smrt.
- Přitom třeba k ohřátí 1 l vody o $1 \text{ }^\circ\text{C}$ potřebujeme 4180 J, tj. energii více než 4x větší.

γ IZ: $\text{LD}_{50} \sim 4 \text{ Gy}$



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



versus



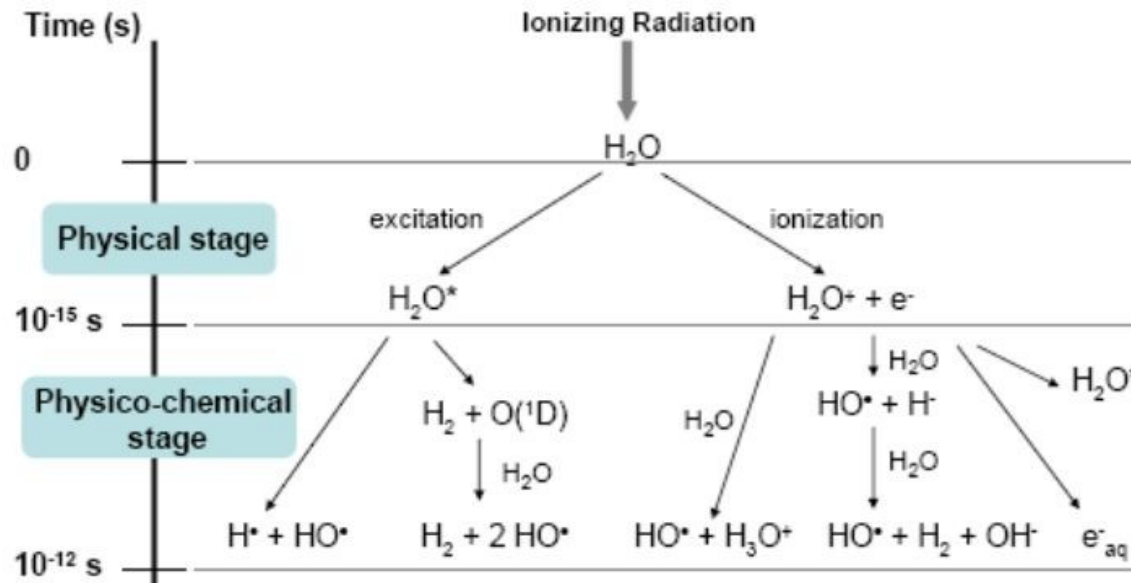
Tepelný ohřev:
 $V = 1 \text{ liter H}_2\text{O}$
 $\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$
 $\rightarrow 4180 \text{ J}$
(tzn. 4x více)



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
- I tento proces je velmi rychlý, netrvá déle než 10^{-14} - 10^{-10} sec.

Water radiolysis : detailed mechanisms



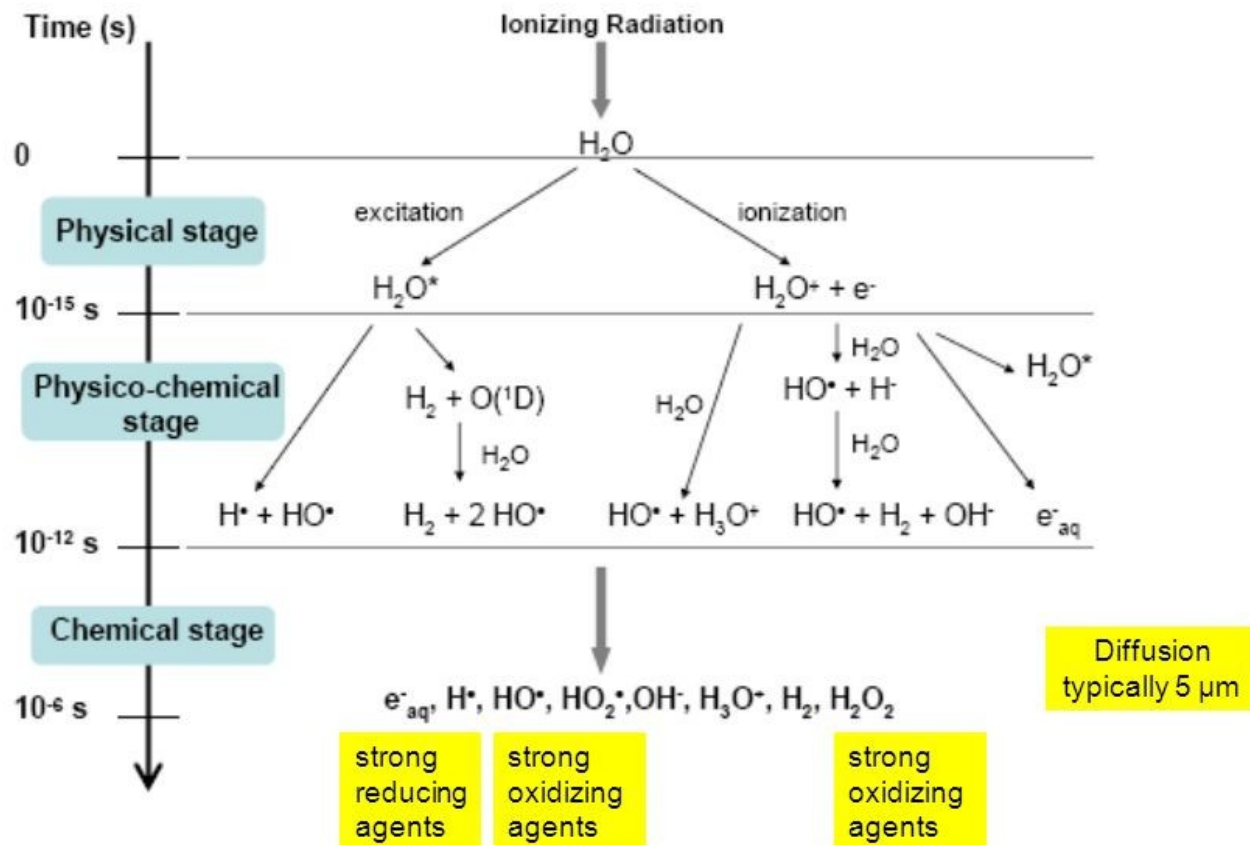
Interakce IZ s živou hmotou

- **CHEMICKÉ STÁDIUM**
- Vzájemnou **rekombinací** vytvořených radikálů některé z nich zanikají, a přestávají tak být pro biomolekuly nebezpečné; například vzniká opět voda
 - $\text{H} \text{ a } \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
- Zbývající radikály mezi sebou též reagují za vzniku dalších více či méně reaktivních molekul
 - např. $\text{H} \text{ a } \text{OH} (+\text{O}_2) \rightarrow \text{H}_2 \text{ a } \text{H}_2\text{O}_2$
- 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 H_2 Production under Ionizing Radiation. *Water* 3, 235-253



Specifika biologických systémů

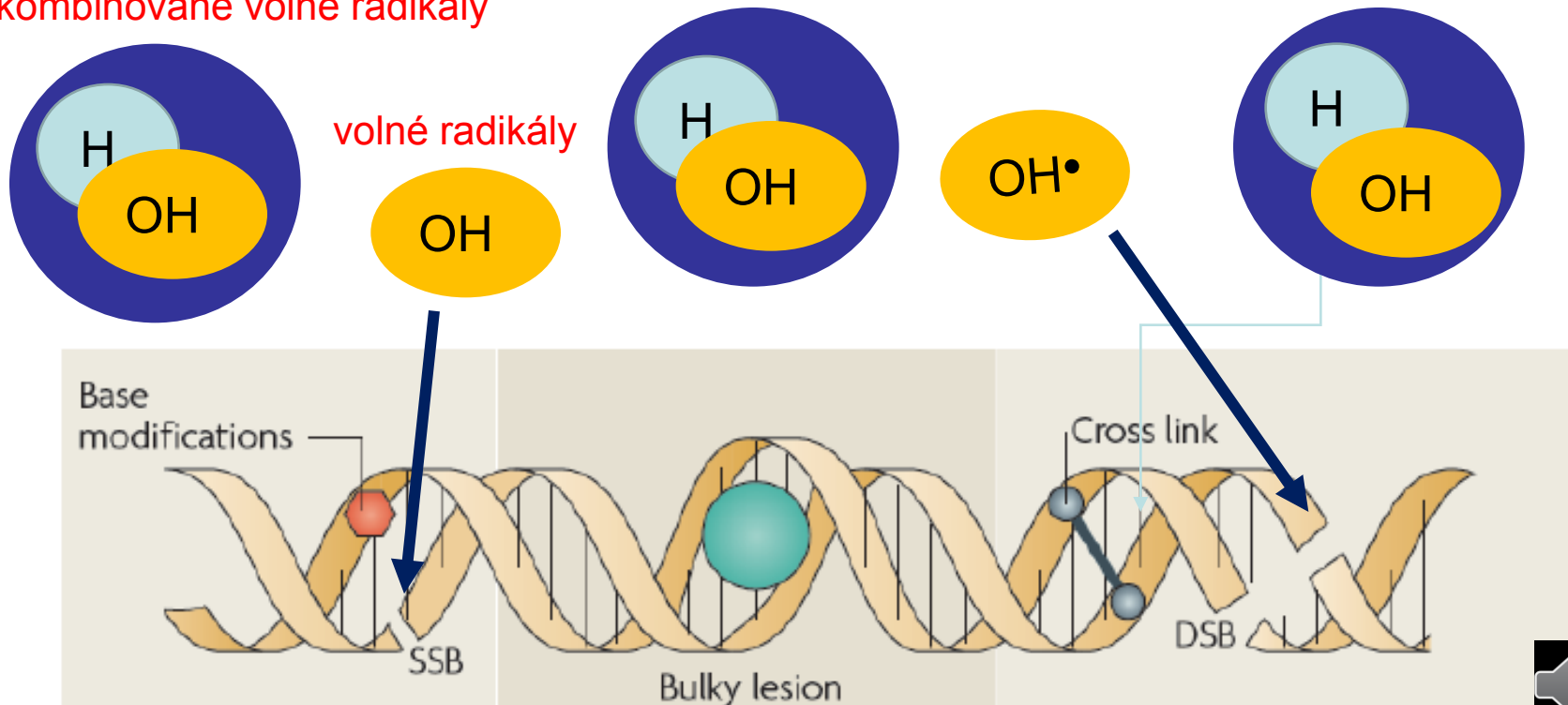
- Až do chemického stádia je interakce neživé hmoty a živých organismů s IZ principiálně stejná,
- U živých organismů však do chemických reakcí vstupují i biomolekuly
- K fyzikálním a chemickým procesům se proto u živých organizmů následně přidávají i specifické procesy chemické a biologické (eventuálně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



Chemické stádium interakce IZ s hmotou – specifika biologických systémů

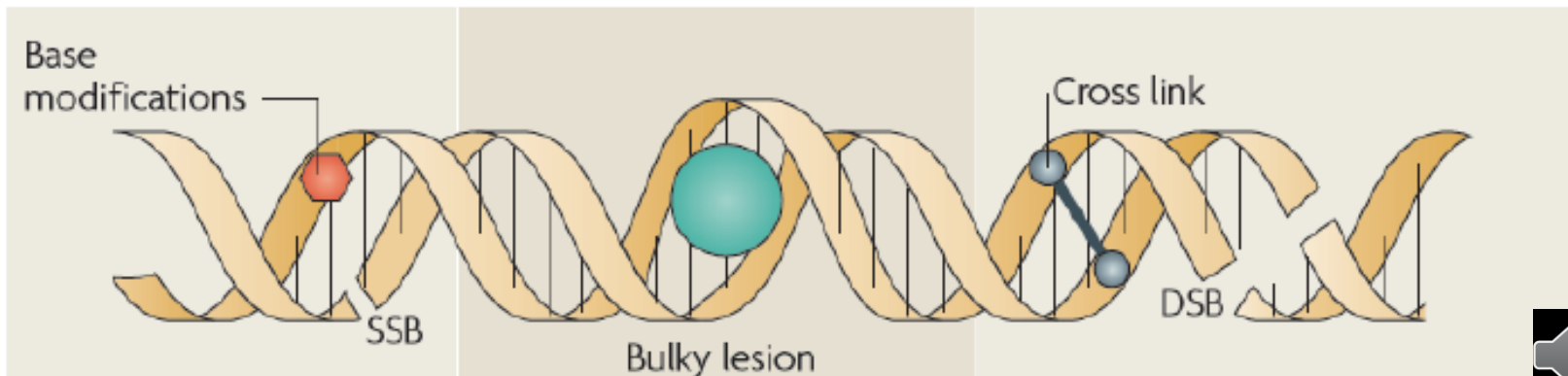
- Nezrekombinované ionty, radikály, excitované atomy a další produkty reagují s biologicky důležitými organickými molekulami
- "atakují" DNA, RNA, enzymy, strukturní proteiny, lipidy membrán přičemž často mění složení a funkci těchto molekul.

zrekombinované volné radikály



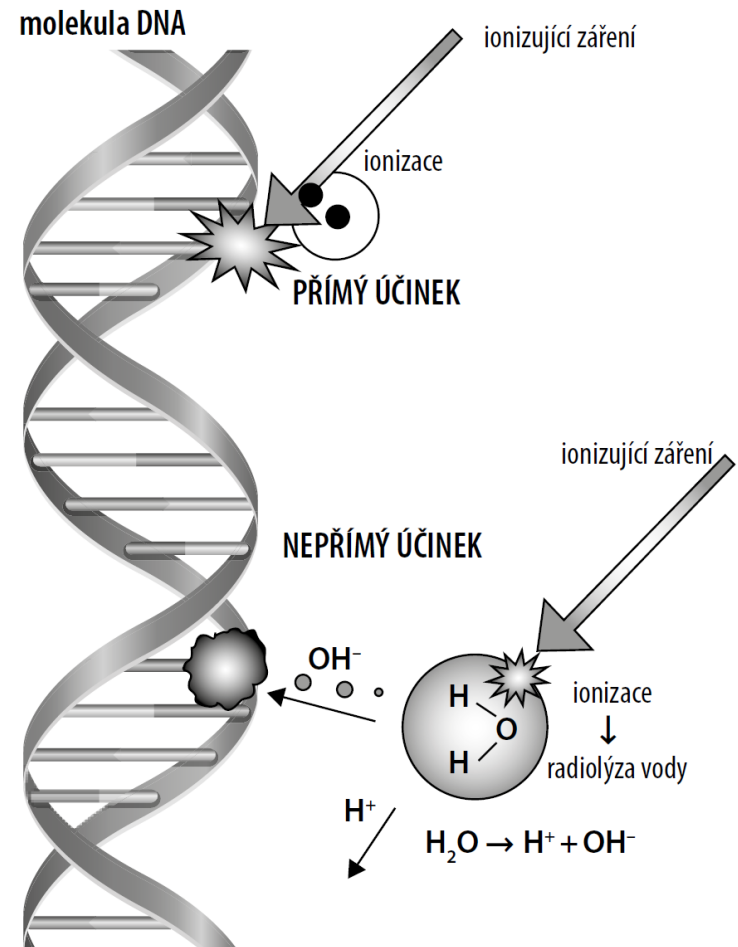
POŠKOZENÍ DNA – prvotní nastínění problému

- Typickou poruchou na molekulární úrovni jsou **zlomy vlákn** v molekule DNA
 - buď zlom jen jednoho vlákna (**SSB**, single strand break),
 - nebo úplný zlom dvojlákna 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).



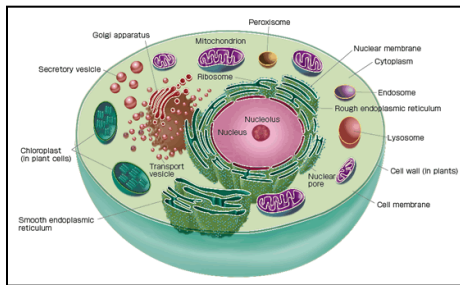
Chemické stádium interakce IZ s hmotou – specifika biologických systémů

- **Zlomy v DNA** mohou vznikat i přímo následkem fyzikální interakce IZ nebo sekundárních (delta) elektronů (viz později) s DNA, nejen tedy následkem chemického poškození
- Jednotlivé procesy tohoto 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.

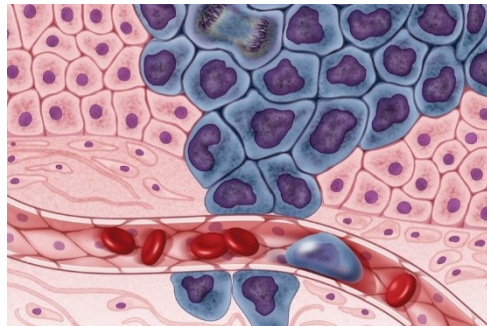


Interakce IZ s živou hmotou

BIOLOGICKÉ PROCESY



Změny na úrovni buněk



Změny na úrovni tkání, orgánů
a orgánových soustav

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

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



Medicínské manifestace
úrovni celého organismu



Interakce IZ – biologické stádium

- Buňky v závislosti na rozsahu poškození **umírají nebo přežijí a aktivují komplexní odpověď buňky na ozáření.**
- Cílem této odpovědi je **opravit** poškozené biomolekuly a navrátit buňku do původního stavu,

DDR –DNA damage repair



- V případě neúspěšné reparace přechází buňka do **senescence** nebo iniciuje sebevražedné buněčné procesy – **apoptózu***
- Apoptóza = geneticky naprogramovaná buněčná smrt u mnohobuněčných organizmů. Na rozdíl od nekrózy nevyvolává ve tkáni zánět (viz samostatná přednáška).



Úspěšná reparace

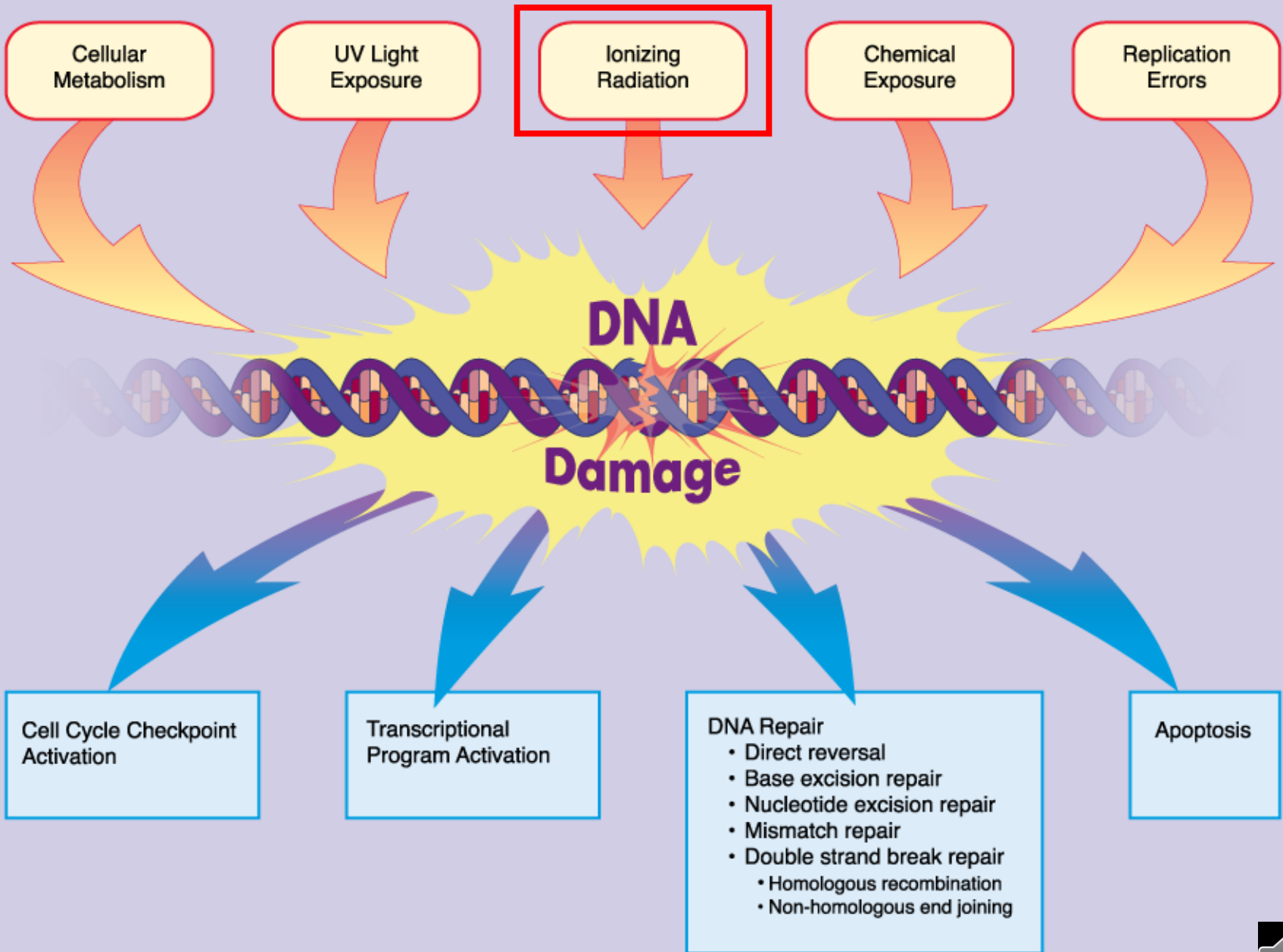


Přechod do
senescence



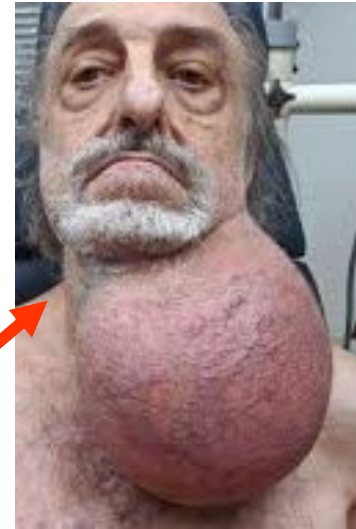
Buněčná sebevražda
- apoptóza





Interakce IZ – medicínské stádium

- Poruchy funkce biomolekul mohou tedy kromě umírání buněk vyústit také ve změnu genetické informace u buněk přeživších,
- Smrt buněk a genetické poškození se následně různým způsobem projeví na úrovni tkání a orgánů a posléze i celého organismu (**MEDICÍNSKÉ STÁDIUM**).
- „Biologické stádium“ se **při vysokých dávkách** záření může manifestovat již po několika desítkách minut (akutní poškození či **nemoc z ozáření - ARS**),
- **Při nižších dávkách** však může zahrnovat dlouhou **dobu latence** několika let nebo i desítek let (**pozdní stochastické účinky**).
- Konkrétní druhy biologických účinků ionizujícího záření budou vysvětleny později.

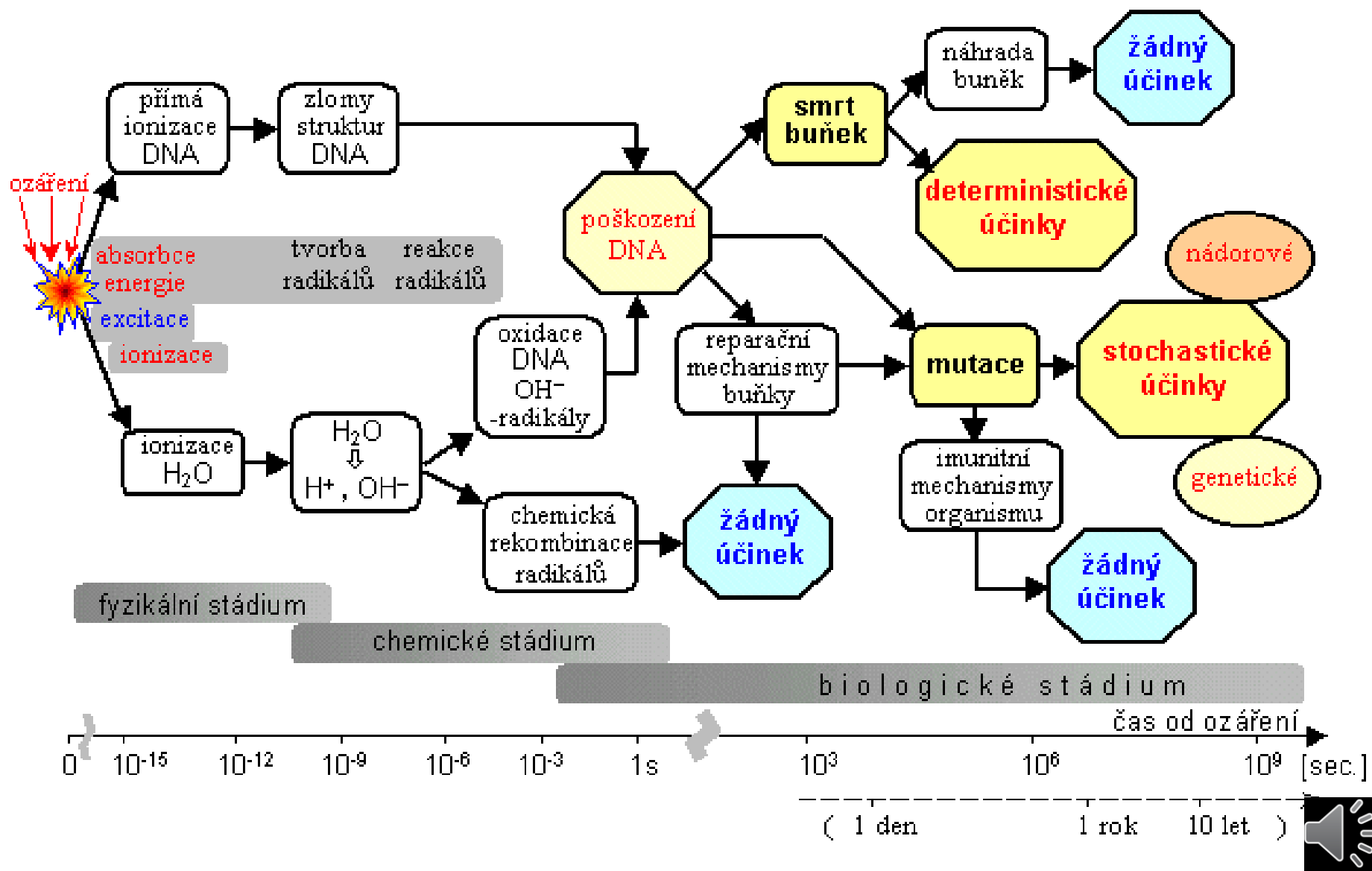


Interakce IZ s živou hmotou – SHRnutí

Fáze	Proces	Trvání
Fyzikální	Absorpce energie záření v atomech a molekulách, ionizace a excitace	10^{-16} s
Fyzikálně-chemická	Interakce iontů s molekulami Mezimolekulární interakce Tvorba volných radikálů	10^{-6} s
Chemická	Interakce volných radikálů s biologicky významnými molekulami, buňkami a DNA	Sekundy
Biologická/ medicínská	Reparace buněk, smrt buněk, změny v genetických datech buněk - mutace	minuty až desetiletí



Interakce IZ s živou hmotou – SHRNUTÍ



Interakce IZ s hmotou

I. FYZIKALNÍ INTERAKCE

V zásadě rozlišujeme

- Interakce přímoionizujícího záření
 - Interakce těžkých nabitých částic
 α částice, p^+ , štěpné trosky vzniklé při štěpení uranu ap.
 - Interakce lehkých nabitých částic
 β^- (elektrony), β^+ (pozitrony)
- Interakce nepřímoionizujícího záření
 - Interakce fotonů γ , RTG
 - Interakce neutronů



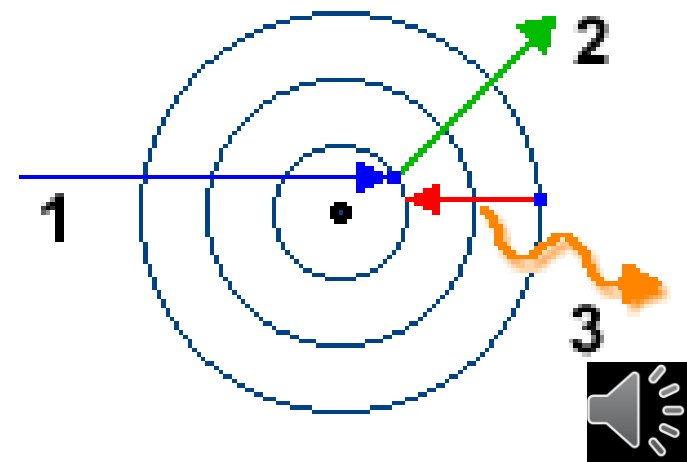
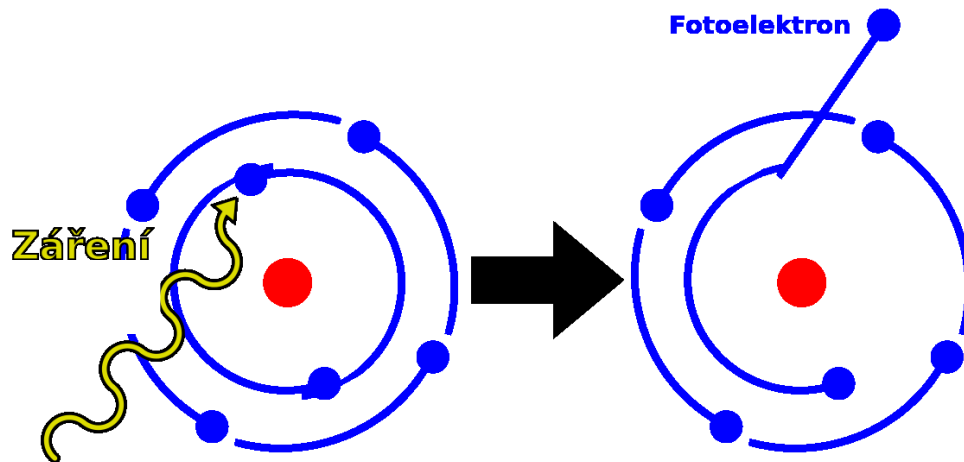
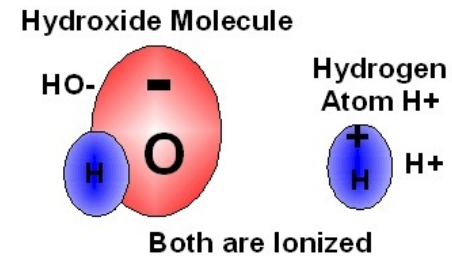
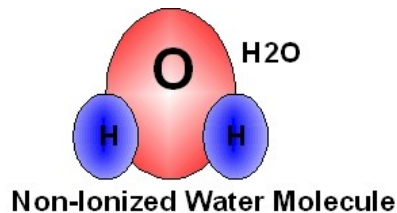
Interakce přímoionizujícího záření

- Nabitá částice při průchodu látkou ztrácí svou kinetickou energii převážně **Coulombovskou (elektrickou) interakcí s elektrony** v atomech látky.
- Základní interakcí přímo ionizujícího záření je tak **IONIZACE**. Právě tento projev dal IZ jméno
- Obdrží-li elektron dost energie na to, aby se zcela uvolnil z vazby k mateřskému atomu, vzdálí se od něj trvale - dochází k **ionizaci atomu**
- z elektroneutrálních atomů [$p^+ = e^-$] vznikají kladně nabitě částice, **kationty**, a **volné elektrony**.
- reakcemi s e^- vznikají záporně nabitě **anionty**
- ionty jsou velice reaktivní a vedou k celé řadě chemických reakcí



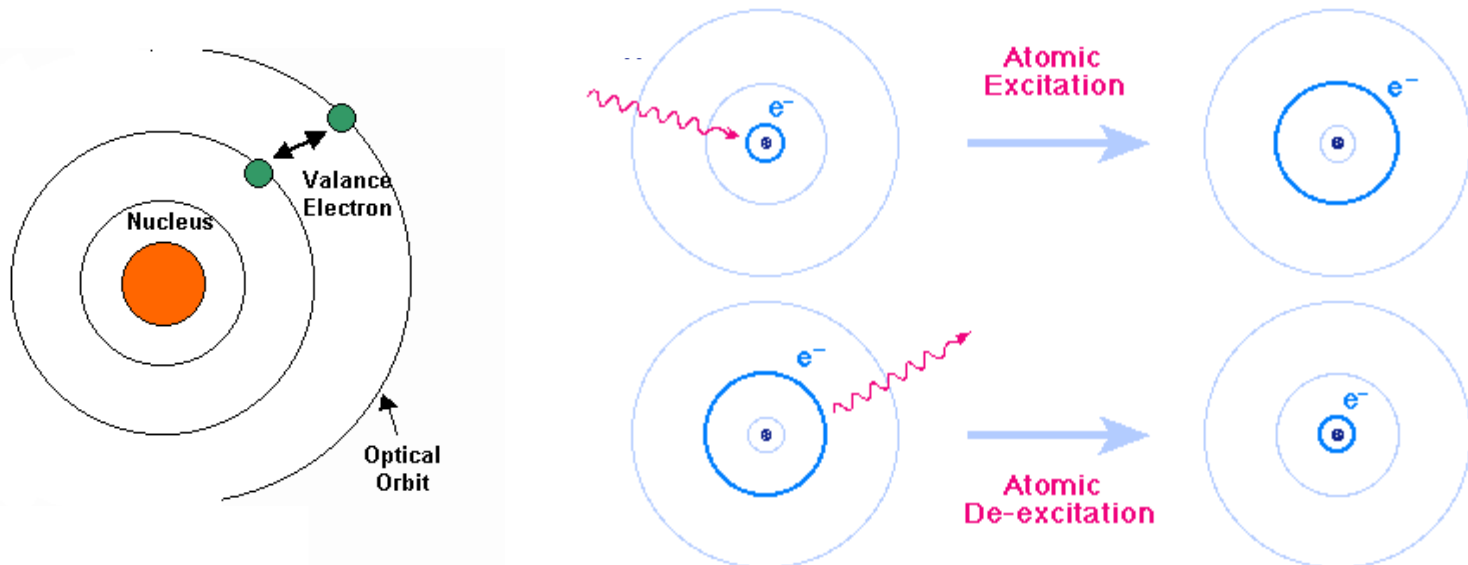
Interakce přímoionizujícího záření

- Přímo ionizující záření.** je takové záření, které je schopné při svém průletu hmotou látku přímo ionizovat – to platí pro IZ tvořené elektricky nabitými částicemi.

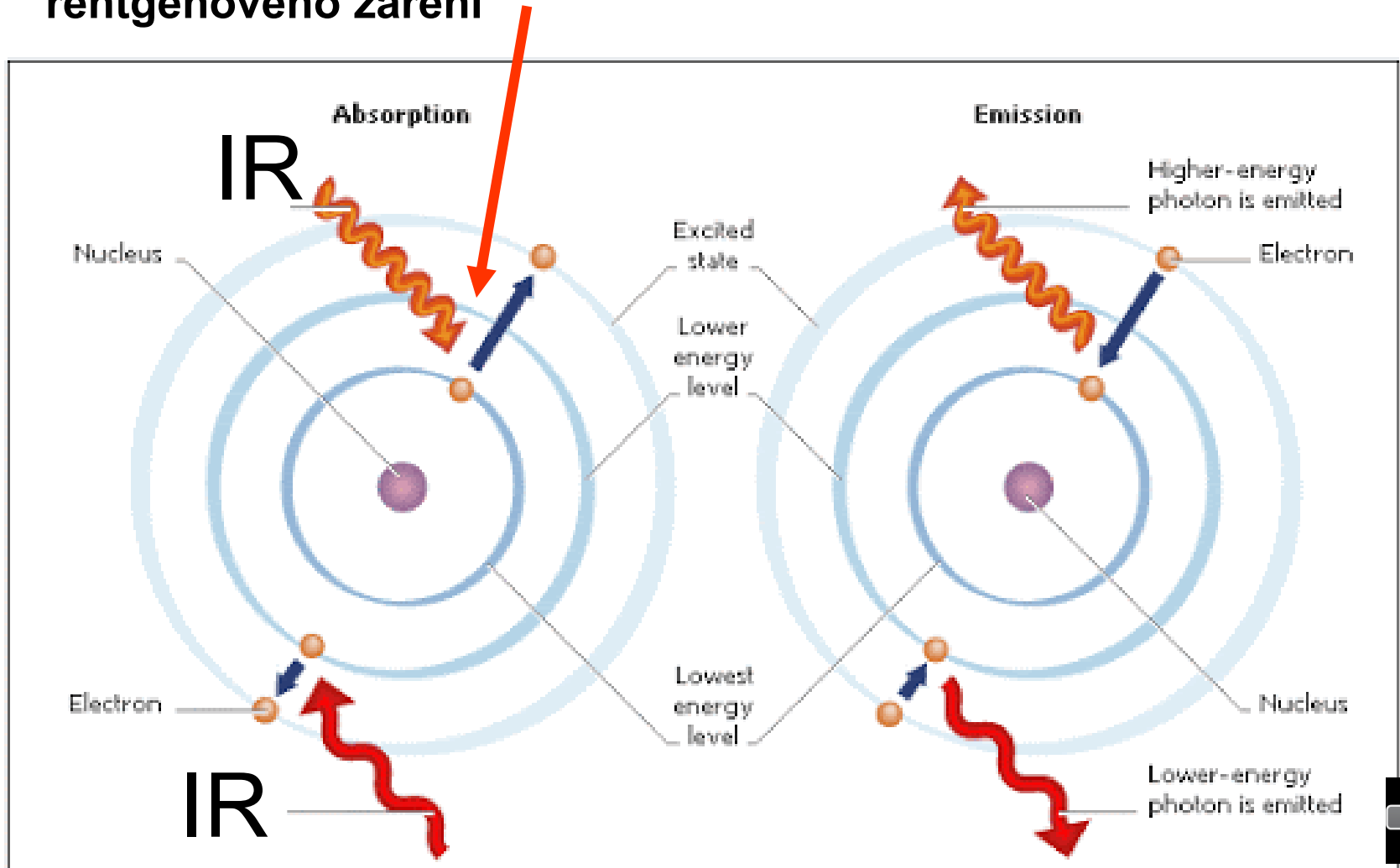


EXCITACE

- Je-li energie předaná elektronu v atomovém obalu menší, než je zapotřebí k ionizaci, může dojít alespoň k **vybuzení elektronu do energeticky vyšších orbitalů** (vzdvížení e^- na vyšší energetickou hladinu) – tj. **excitaci** atomů.
- Excitovaný (vzbuzený) stav atomu není stálý – vzápětí přeskočí elektron zpět na původní hladinu - nastane **deexcitace**,
- přičemž rozdíl energií se vyzáří ve formě fotonu elektromagnetického záření (nebo více fotonů, je-li přechod po etapách, např. z $n=3$ na $n=2$ a pak na $n=1$). Tento děj je podstatou **luminiscence**

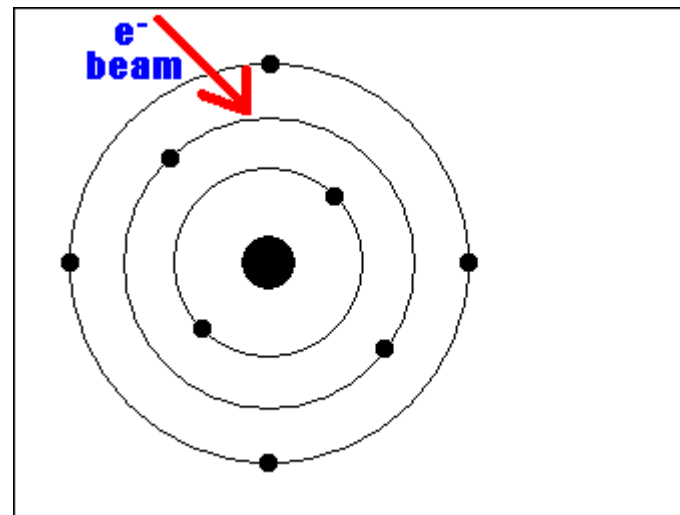
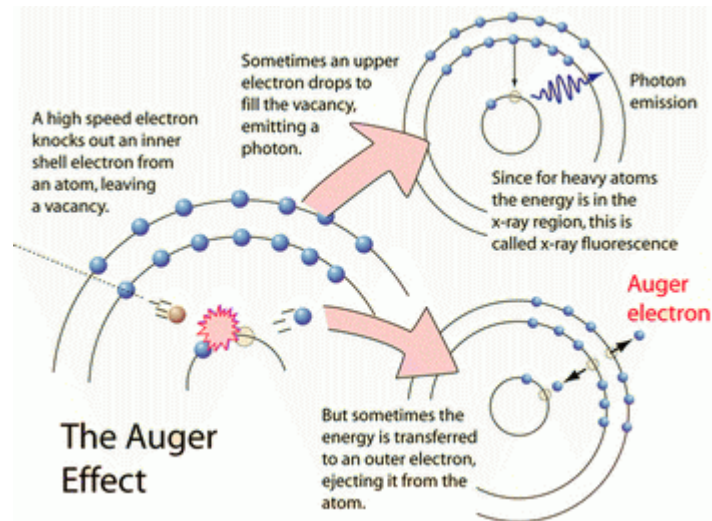


- Při excitaci elektronů na vnějších slupkách je emitováno **viditelné světlo**,
- při excitaci na vnitřních slupkách pak **fotony charakteristického rentgenového záření**



Augerův efekt

- Díra po e^- vyraženém z atomového obalu zářením je v rámci deexcitace zaplněna přeskokem e^- z vyšších energetických hladin.
- Oproti předcházejícímu scénáři však není rozdíl energií elektronů vyzářen ve formě RTG záření, nýbrž je předán dalšímu elektronu nebo elektronům, které jsou z elektronového obalu atomu následně „vystřeleny“
- U těžkých prvků (vysoké Z) může být těchto e^- třeba až 20 → elektronové „spršky“
- Potenciálně výhodné v radioterapii, kde např. kovové nanočástice (Au, Pt, Gd, ...) mohou teoreticky lokálně zvyšovat účinek ionizujícího záření (nanočástice jsou preferenčně vychytávány nádorovými buňkami [díky tzv. EPR efektu a jejich vyšší metalické aktivitě] a po ozáření emitují mj. spršky Auger elektronů)

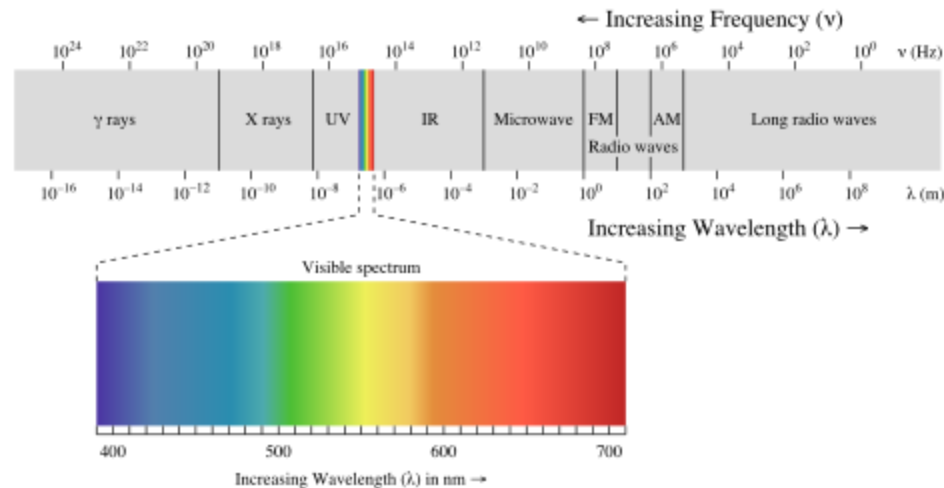


Interakce IZ s hmotou - IONIZACE

- Z předchozích lekcí již vím, že
- minimální energie potřebná k ionizaci ve vodném prostředí (cytoplazma) je 33 eV.
- To odpovídá záření s kratší vlnovou délkou, než přísluší ultrafialovému záření, přibližně tedy **<40 nm**.
- Vztah mezi energií fotonu a vlnovou délkou je dán rovnicí

$$E = h \cdot f = h \cdot c / \lambda;$$

- E = energie fotonu, f = frekvence, h = Planckova konstanta a λ = vlnová délka.

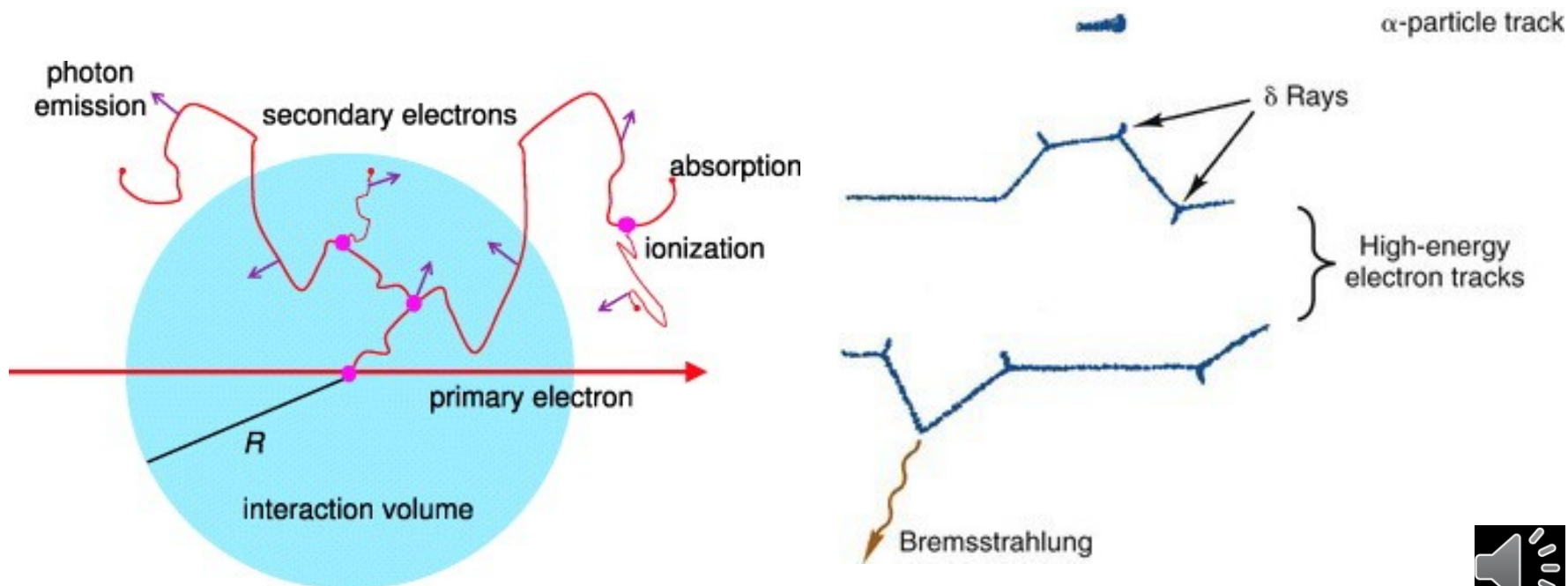


- **Absorpce** energie ionizujícího záření v látce má kvantový charakter (viz dřívější přednášky)
- Pro srovnání: Neionizující záření **není (z logiky věci) schopno ionizovat a excitovat** absorbující hmotu. Energie stačí pouze ke změně vibračního či rotačního stavu molekuly
- **Absorpce** energie neionizujícího záření v látce nemá kvantový charakter



IONIZACE

- **Primární ionizací** se rozumí počet iontových párů vytvořených vyražením elektronů primární částicí.
- Některé elektrony vyražené při ionizaci (tzv. **delta elektrony, paprsky delta**) mají tolik energie, že mohou samy dále po své dráze ionizovat - jedná se o **sekundární ionizaci** (název paprsky delta proto, jelikož stopa sekundárních e⁻ v mlžné komoře má charakteristický rozvětvený tvar).



IONIZACE

- Při ionizaci a excitaci ztrácí letící nabitá částice svou kinetickou energii předáváním své hybnosti elektronům působením elektrických Coulombových sil.
- **Velikost hybnosti předané elektronům** je úměrná velikosti Coulombových sil a času, po který tyto síly působí (době interakce).
 - **Coulombovské síly** jsou úměrné náboji částice q a elektronové hustotě látky, jež je daná hustotou ρ a atomovým číslem Z ($\rho \cdot Z$).
 - **Doba interakce** je nepřímo úměrná rychlosti částice v , takže energie, která je elektronům předána, je úměrná $1/v^2$.
- Velikost ztráty energie na jednotku dráhy letu částice definuje tzv. **lineární přenos energie, LPE (LET)**
- anglická zkratka **LET**, odvozená z Linear Energy Transfer, se používá patrně častěji a preferuji ji i dále v prezentacích

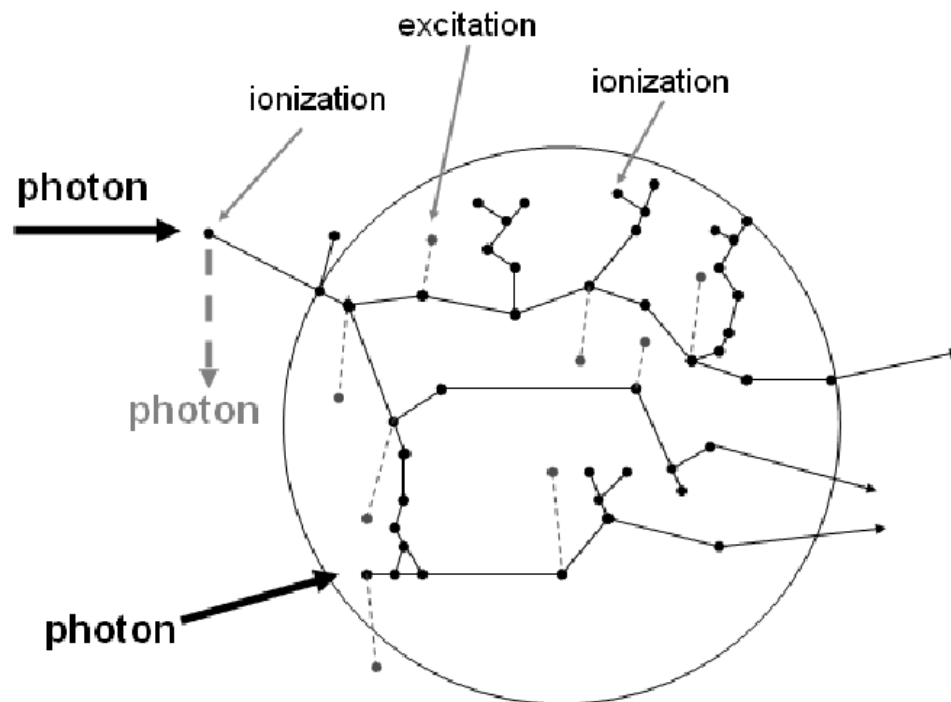


LET, LINEÁRNÍ PŘENOS ENERGIE

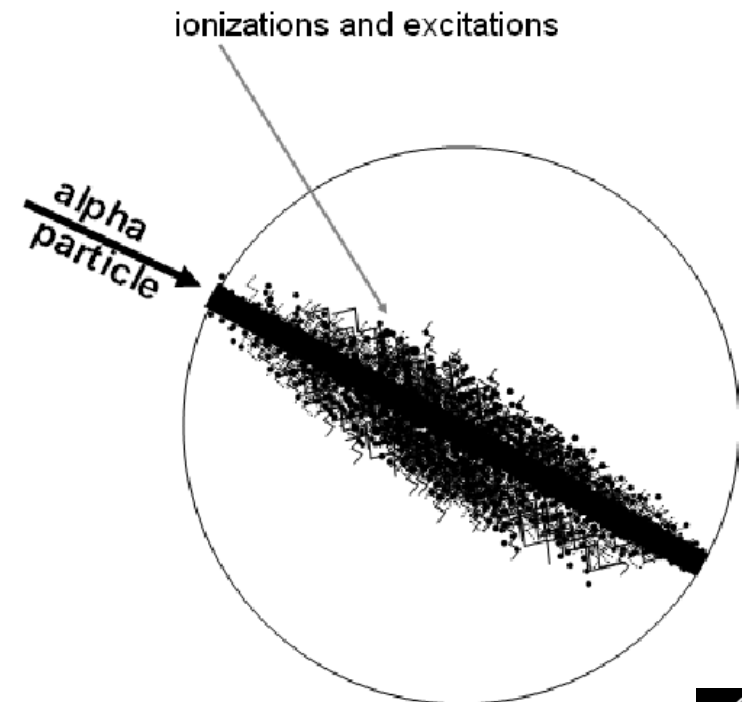
- **Shrneme-li uvedené, je LET** přímo úměrný náboji částice a elektronové hustotě látky ($q \cdot \rho \cdot Z$) a nepřímo úměrný čtverci rychlosti částice ($1/v^2$), tedy:
- **$-dE/dx \sim q \cdot \rho \cdot Z/v^2$ [keV/ μm];**
- LET (Linear Energy Transfer) vyjadřuje velikost energie předané ionizující částicí na jednotku délky její dráhy v daném prostředí. Vyjadřuje se obvykle v keV/ μm .
- přesná hodnota je dána tzv. **Betheho vzorcem**, v němž je zahrnut i střední excitační potenciál atomů látky, přibližně úměrný protonovému číslu Z .



Záření s nízkým LET (low-LET IR)



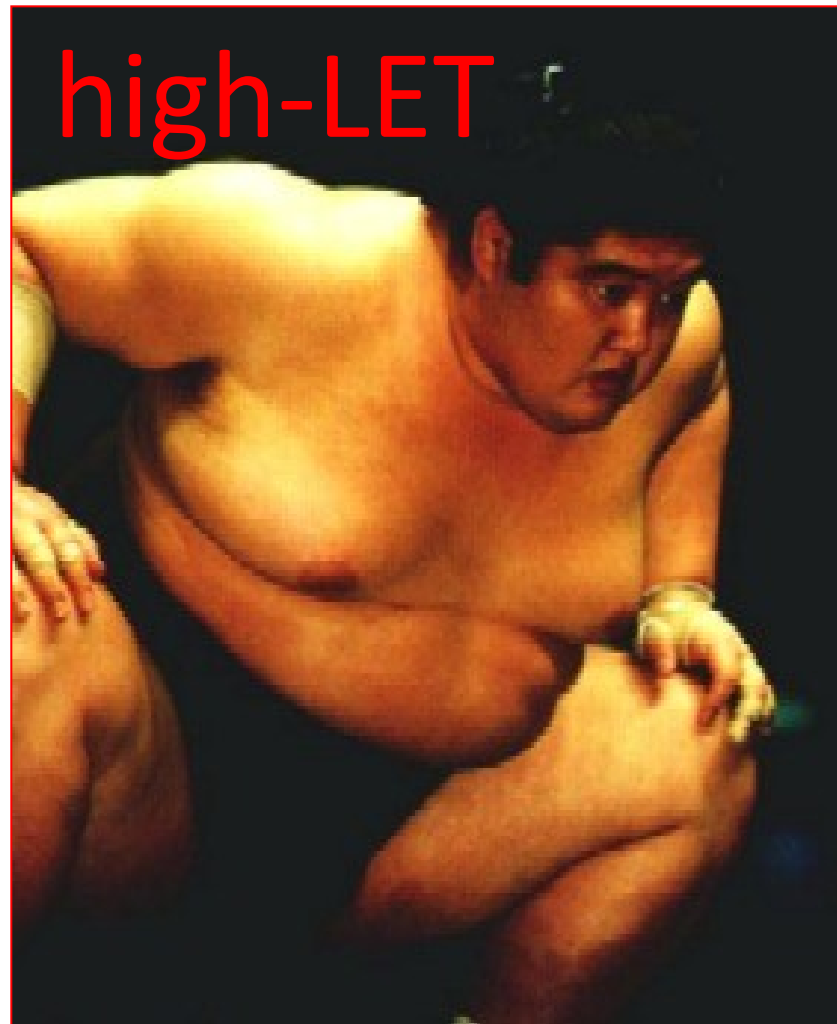
Záření s vysokým LET (high-LET IR)



ROZDÍLNÉ VLASTNOSTI ZÁŘENÍ VE VZTAHU K LET HMOTNOST/VELIKOST



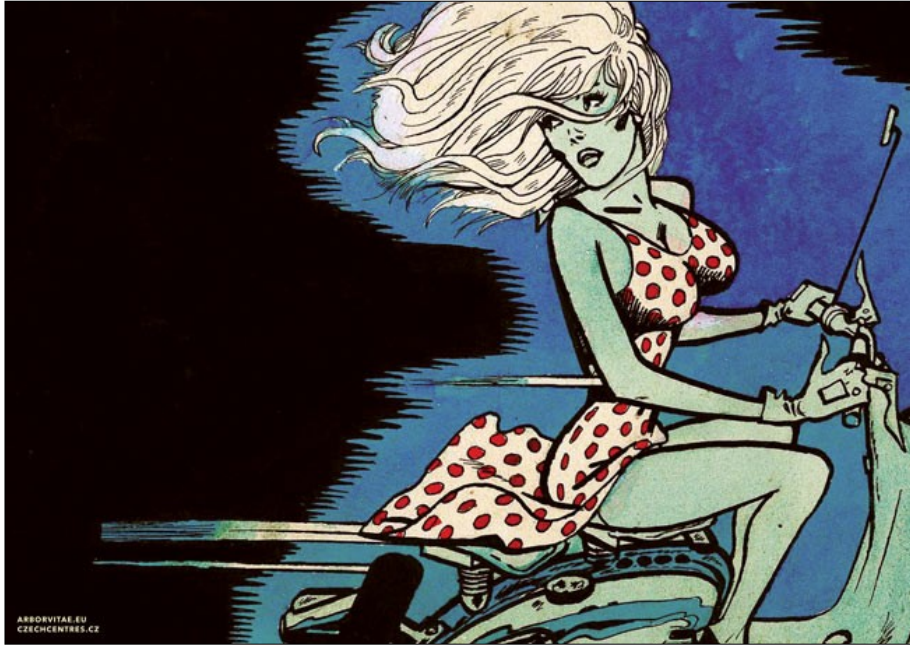
gama foton: hmotnost 0, rychlost v ,
dolet obrovský, počet ionizací/ztráty
energie na jednotku dráhy - malý



těžký iont: hmotnost velká, rychlost
malá, dolet malý, počet ionizací/ztráty
energie na jednotku dráhy – obrovský
(proměnlivý)



ROZDÍLNÉ VLASTNOSTI ZÁŘENÍ VZTAHU K LET - **NÁBOJ**



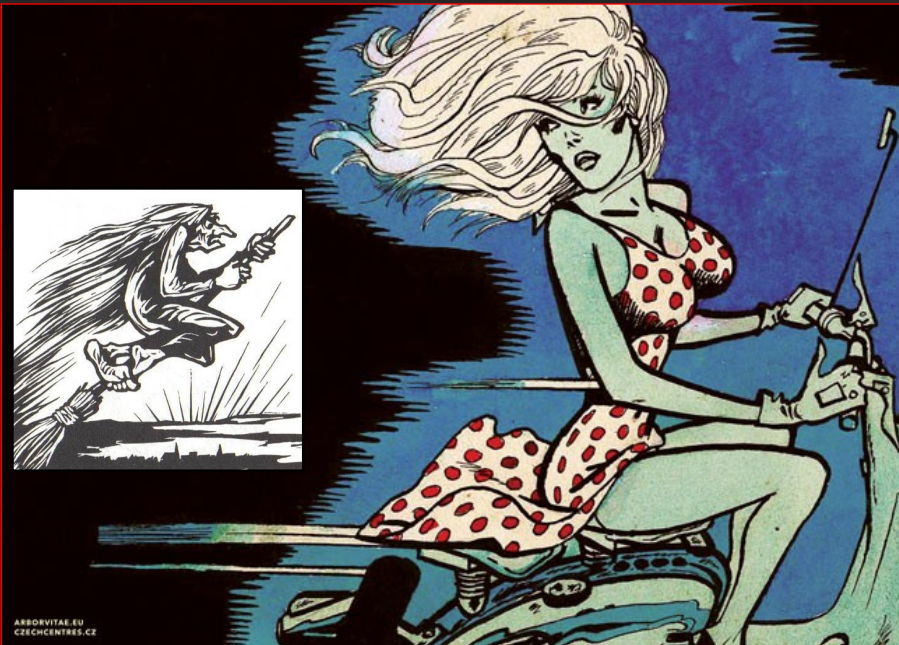
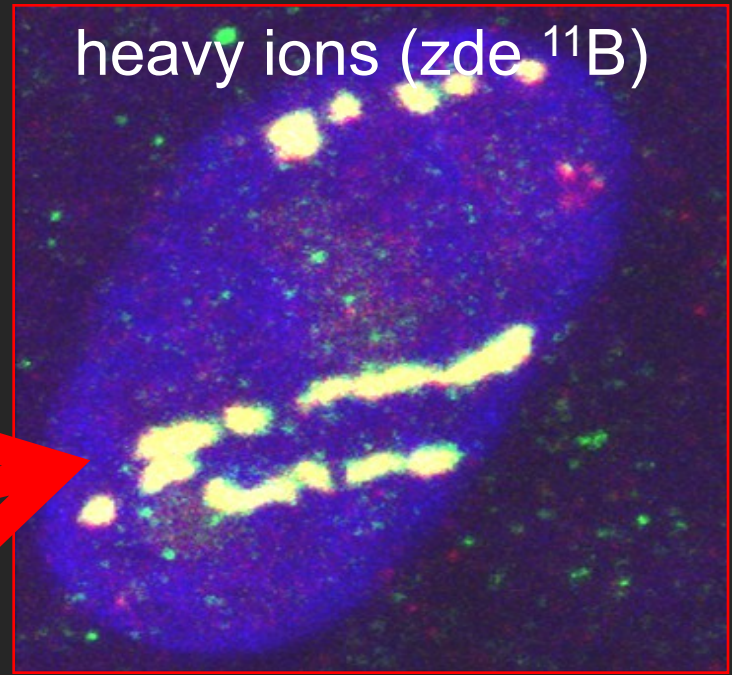
VS



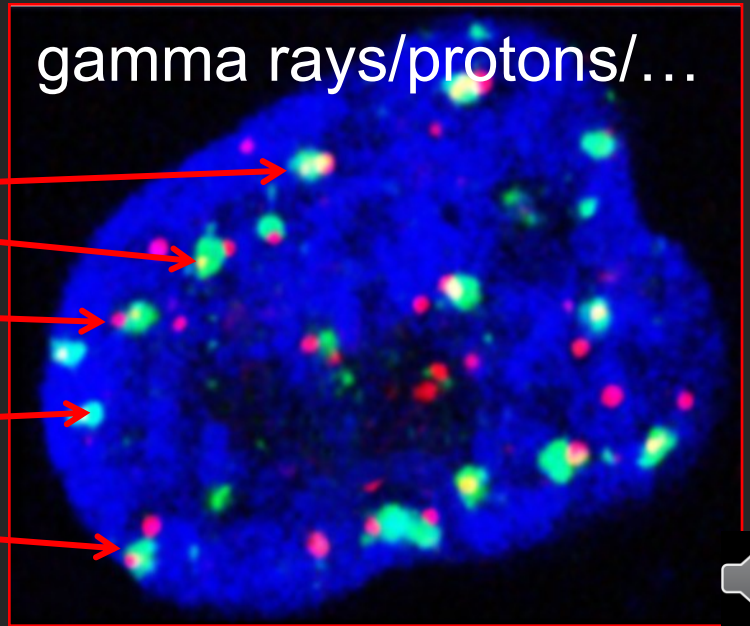
Poškození při stejné dávce (1 Gy)



heavy ions (zde ^{11}B)



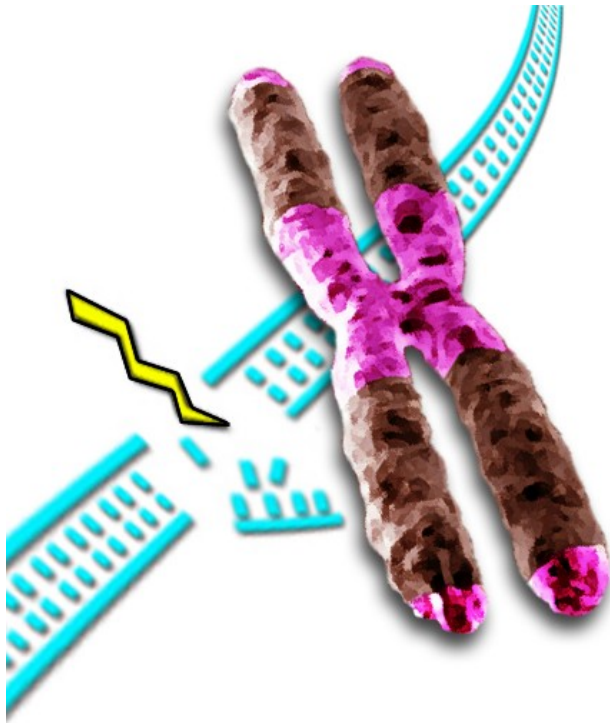
gamma rays/protons/...



BIOLOGICKÉ ÚČINKY IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

Tvorba dvouřetězcových zlomů DNA (DSB)

DSB představují nejzávažnější poškození DNA (ostatní typy poškození jsou mnohem snadněji a přesněji opravitelné)



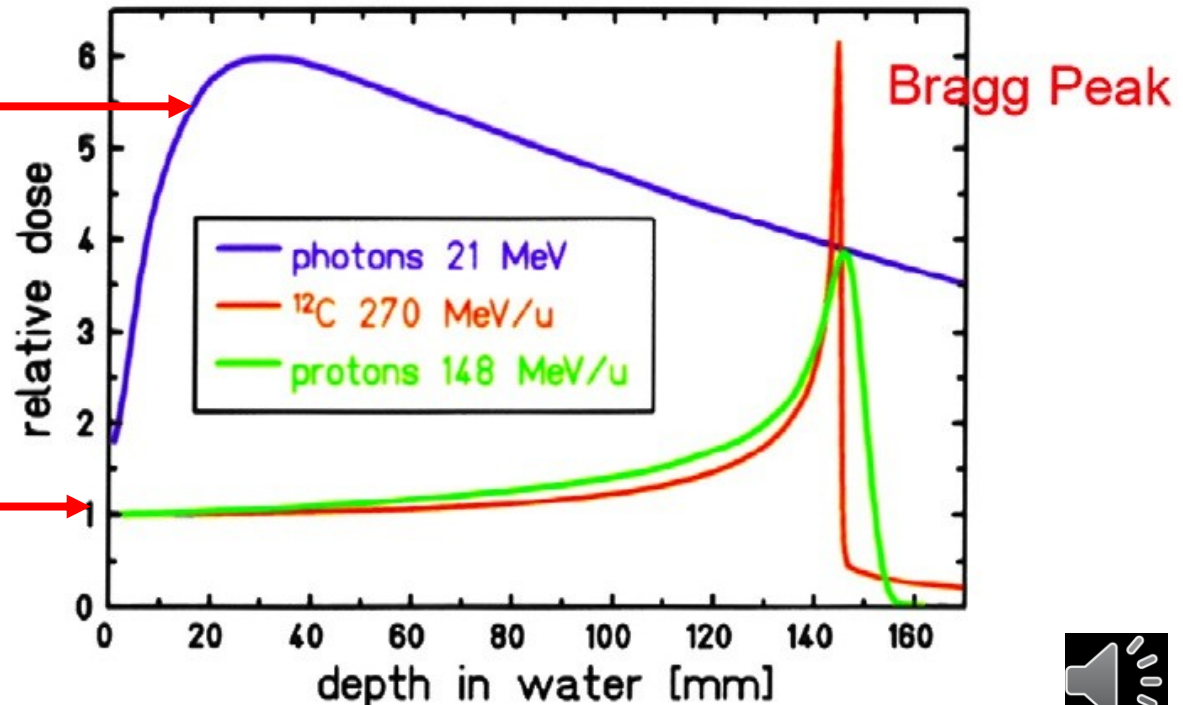
Kumulace špatně opravených DSB = KARCINOGENEZE

Radioterapie (a některé formy chemoterapie): **těž založena na indukci DSB**



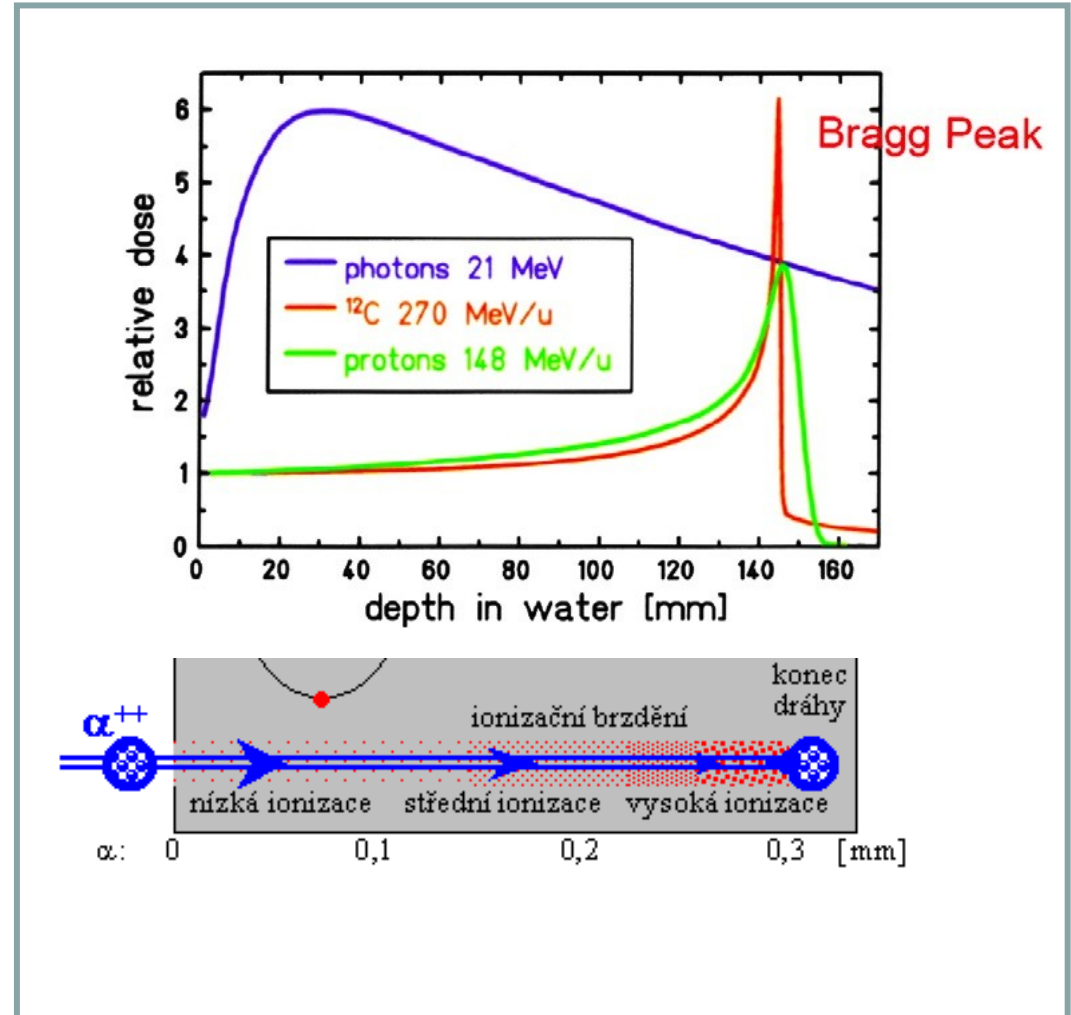
BRAGGOVY KŘIVKY

- **Braggovy křivky** popisují závislost LET (též mluvíme o specifické či lineární ionizaci) na hloubce průniku nabitě částice do látky.
- Jak se nabitá částice brzdí a klesá její rychlost, ionizační účinky rostou, protože při delším čase působení Coulombovské interakce se stačí předat větší energie a vytrhnout více elektronů;

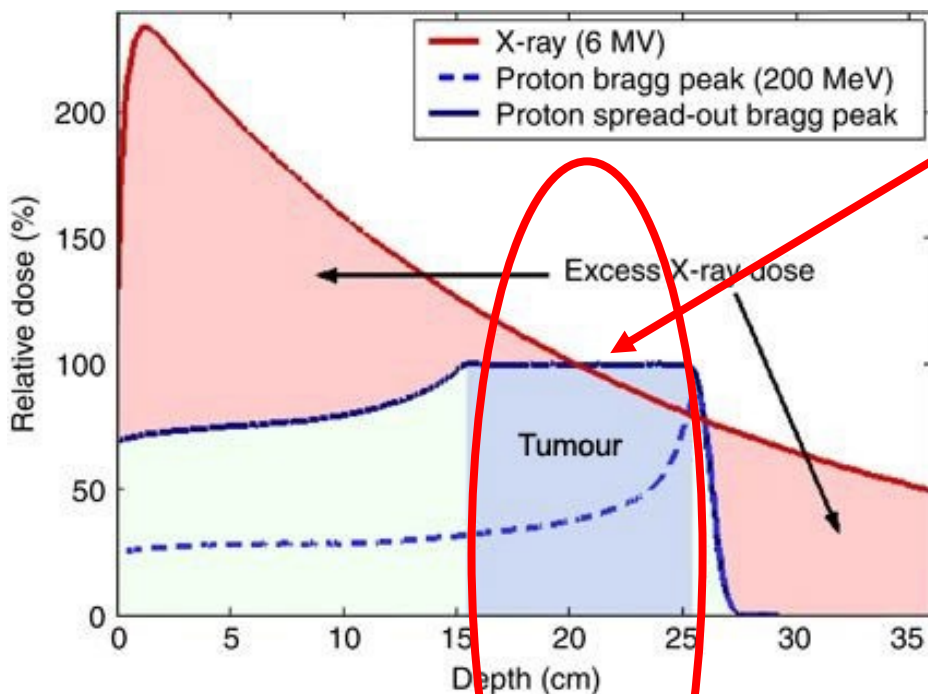


BRAGGOVY KŘIVKY

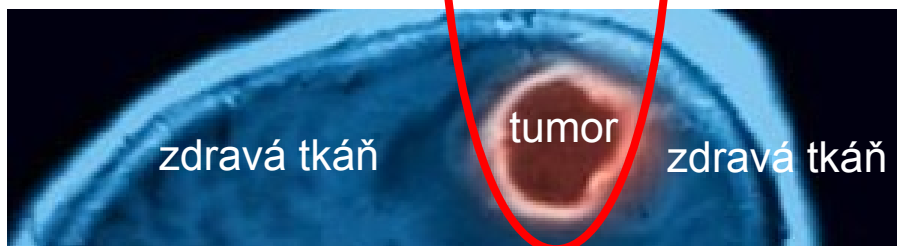
- Energie předaná částicí hmotě je nepřímo úměrná čtverci rychlosti částice →
- Proto předává částice nejvíce energie těsně před svým zabrzděním - křivka hloubkové závislosti specifické ionizace zde má výrazné tzv. **Braggovo maximum** (angl. **Braggův peak**).



- Po zabrzdění je částice neutralizována záchytem elektronů a další ionizace již nepokračuje
- využití této výhodné hloubkové závislosti ionizace **v radioterapii** (tzv. **hadronové radioterapii**) (viz samostatná přednáška).

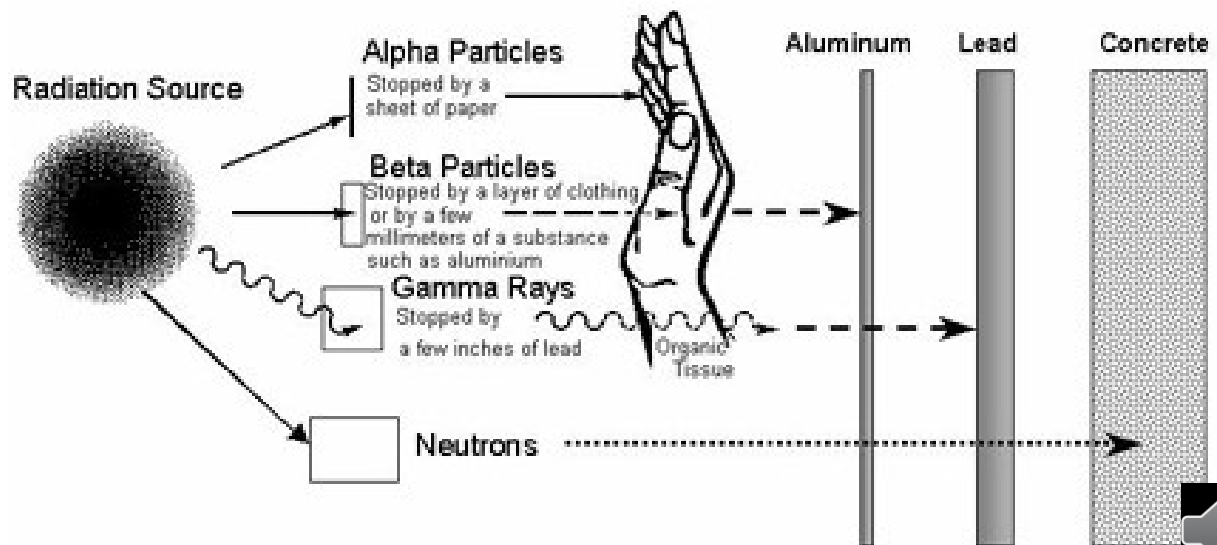
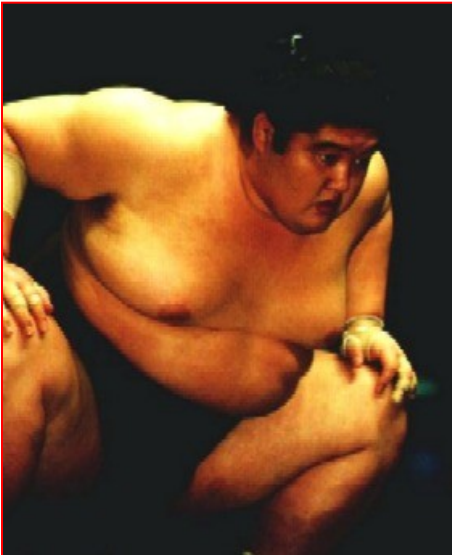


V praxi se používá tzv. spread-out Bragg peak (**SOBP**) – viz samostatná přednáška)

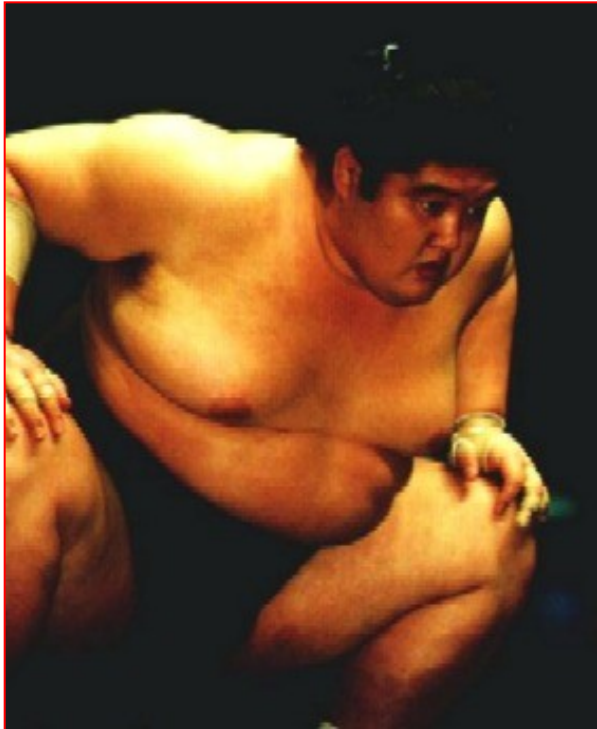


Interakce těžkých nabitých částic - IONIZACE

- hlavním interakčním procesem je zde **IONIZACE**
- ionizuje především vlastní nabitá částice, v menší míře pak vyzařené e-
- dráha pohybu přímá a krátká – dáno vysokou hustotou ionizace kolem dráhy, což vede k vysoké ztrátě energie částice na jednotce dráhy (obdobně jako když se medicinbal valí polem pingpongových míčků)
 - např. α -částice má ve vzduchu dosah (dolet) řádově jen centimetry a záření je zcela odstíněno pouhým listem papíru
 - (v pevných látkách dosah jen μm – desítky μm)



Interakce těžkých nabitých částic – INTERAKCE S JÁDRY



- kromě ionizace se uplatňuje také

INTERAKCE NABITÝCH ČÁSTIC S ATOMOVÝMI JÁDRY

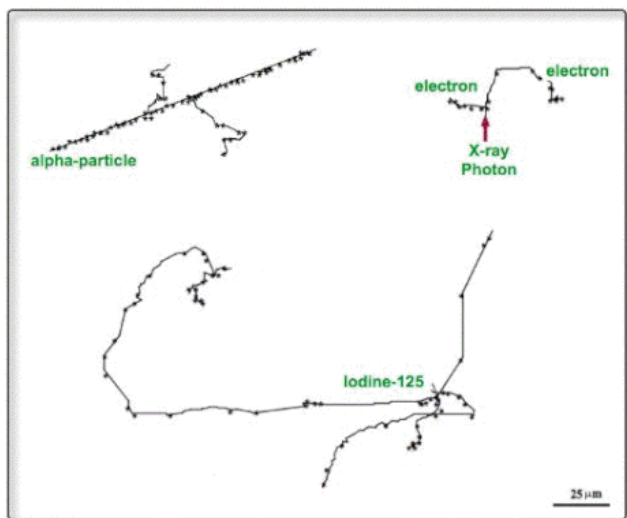
- ve srovnání s ionizací však při běžných reakcích tvoří jen zanedbatelnou složku,
- využívá se jich v některých zdrojích neutronů [např. ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$]
- Při průchodu těžkých nabitých částic (těžké ionty, alfa částice, protony) látkou zpravidla nemusíme uvažovat o ztrátě jejich energie brzdným zářením



Interakce lehkých nabitých částic (e-, pozitrony)

1. IONIZACE

- nejvýznamnějším interakčním procesem je opět IONIZACE
- dráha letu částice (průnik do hmoty) je delší než u těžkých částic,
- dráha je ale zakřivená, takže hustota ionizace je menší

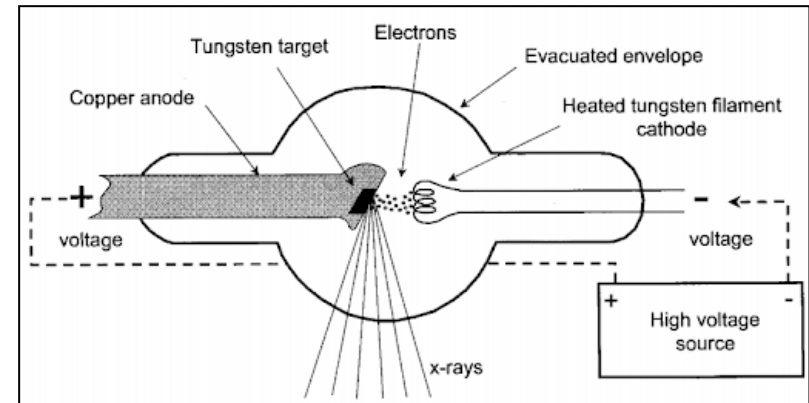


Ionizations and excitations along particle tracks in water, for a 5.4 MeV α -particle (top left), for electrons generated following the absorption of a 1.5 keV X-ray photon (top right) and electrons generated during the decay of iodine-125.



Interakce lehkých nabitých částic

- Obecně má záření β ve vzduchu dolet decimetry až metry.
- Dolet však značně závisí na energii – pro vodu platí přibližně následující vztah:
 $R[\text{cm}] = E[\text{MeV}] / 2$

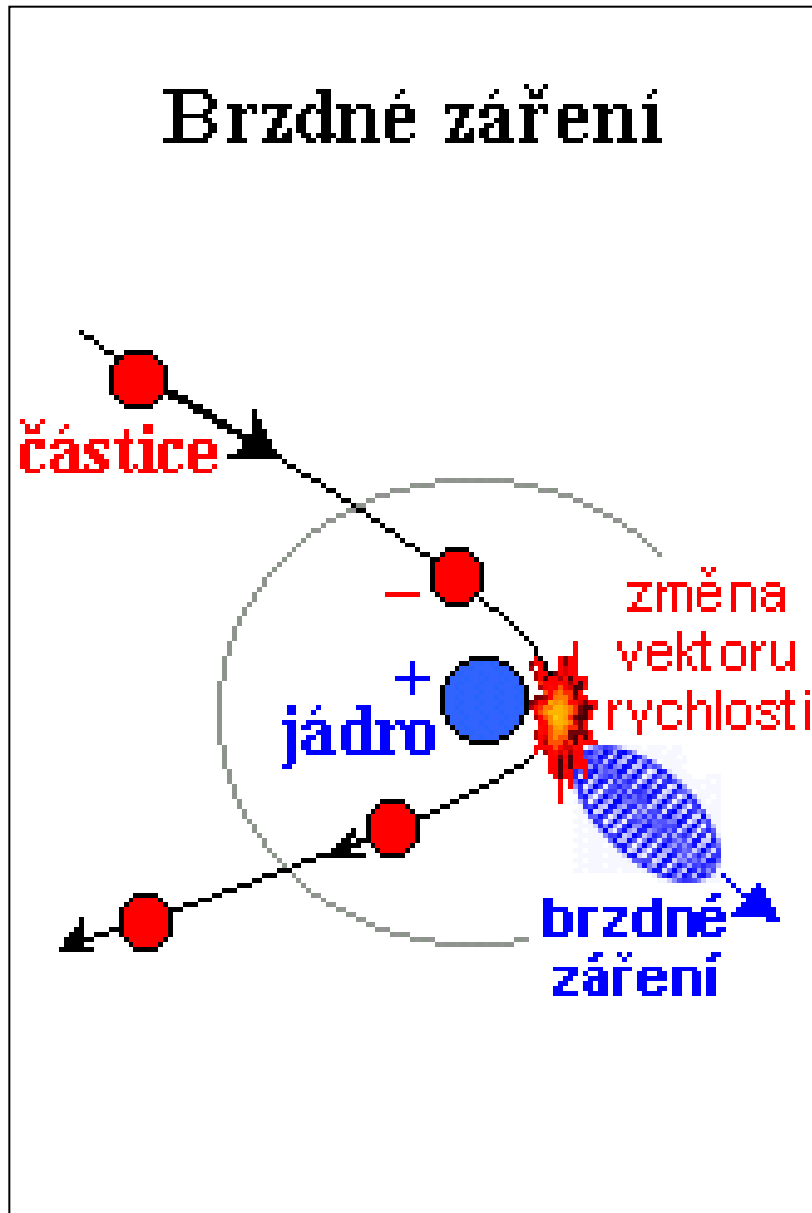


2. BRZDNÉ ZÁŘENÍ

- ztráta energie prostřednictvím emise BZ má u lehkých nabitých částic význam i při relativně nízkých energiích (na rozdíl od těžkých nabitých částic)
- Nejvíce relevantní je však zejména při vyšších energiích



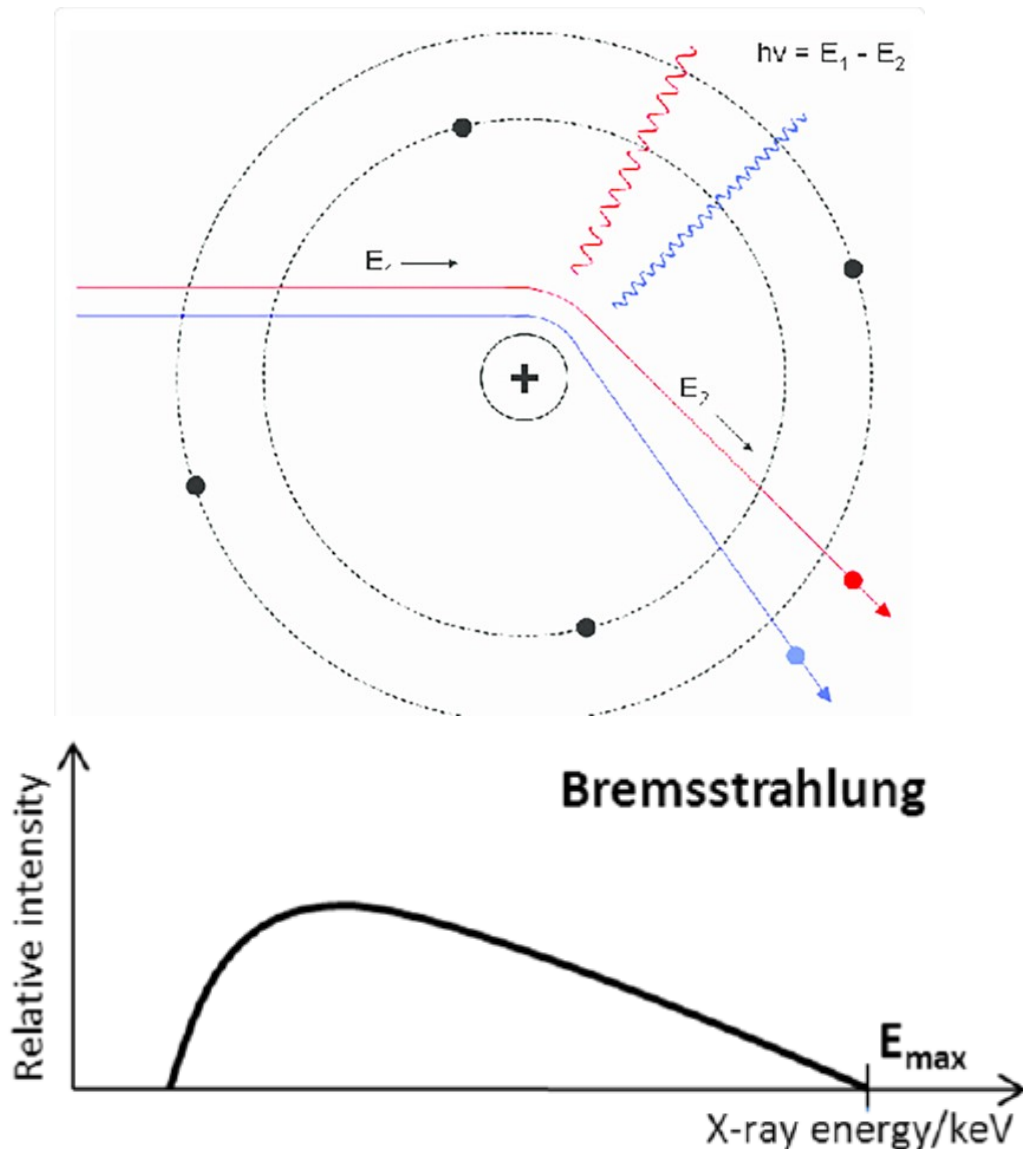
2. BRZDNÉ ZÁŘENÍ



- BZ vzniká při zbrždování beta částic v materiálu (viz přednáška č. 1, RTG)
- ...částice prolétává elektromagnetickým polem mezi atomy a interaguje s ním – to vede ke ztrátě energie, která se vyzáří ve formě fotonového RTG záření.
- Toto záření má **spojité spektrum** a energii, která je menší než energie letícího elektronu. Jedná se o **BRZDNÉ RENTGENOVO ZÁŘENÍ**



Brzdné záření – z německého „bremsstrahlung“, používá se i v anglické literatuře



Energie emitovaných fotonů závisí na:

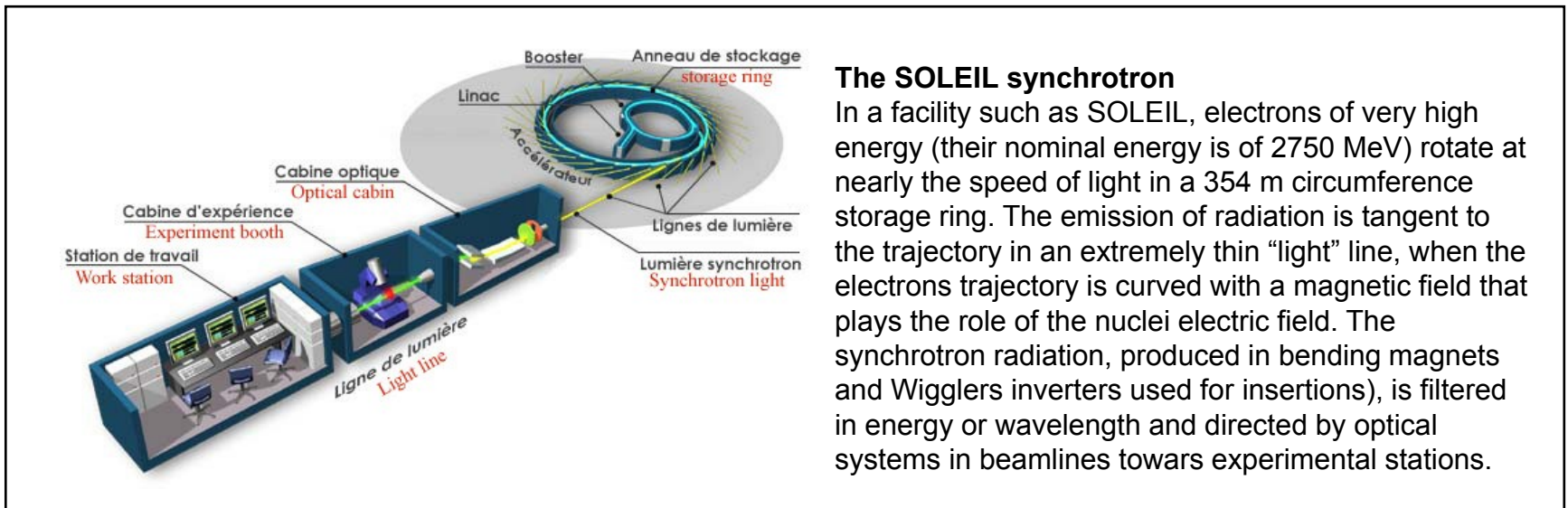
- **Vzdálenosti průletu** částice od jádra (nebo jiné částice)
- **Energii částice** ($\uparrow E$ (rychlost) $e^- \rightarrow \uparrow E$ fotonů BZ, tzn. tím tvrdší záření vzniká.)

Tyto faktory se následně projeví velikostí změny vektoru rychlosti

Rozdílné energie emitovaných fotonů mají za následek **kontinuální energetické spektrum BZ**



- Obecně vzniká BZ, když se rychle letící nabitě částice dostanou do silného elektromagnetického pole, kde jeho vlivem dojde k velké změně rychlosti (deceleraci) a směru letu dané částice.
- Za přirozených podmínek: průlet částice v poli orbitálních elektronů nebo atomových jader,
- BZ však vzniká i v urychlovačích následkem ohybu dráhy částice v magnetickém poli → **SYNCHROTRON** → intenzivní zdroje RTG

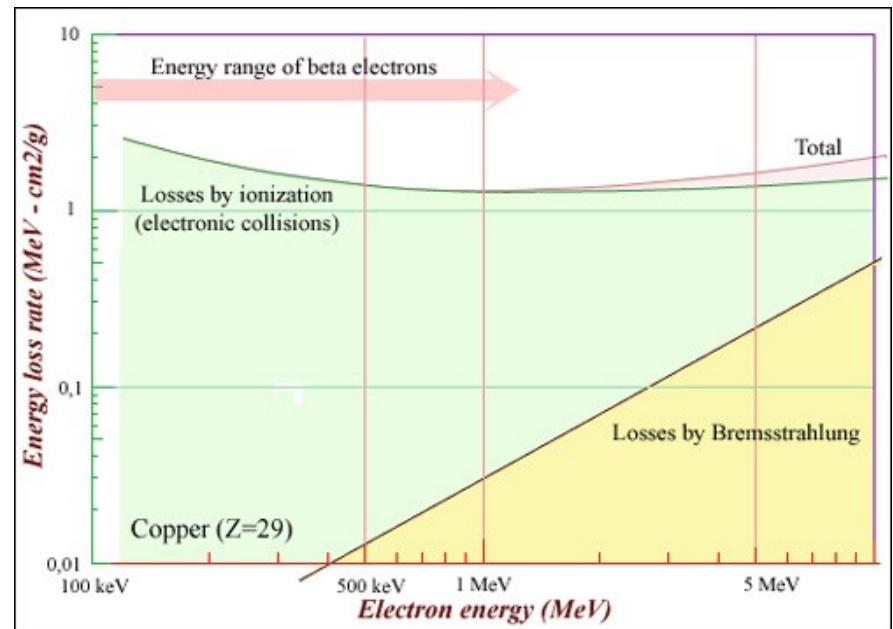


- V užším slova smyslu mluvíme o BZ hlavně v souvislosti s elektrony
- BZ je málo významné z hlediska radioaktivity, protože rozpad beta málokdy produkuje e-/e+ s dostatečnou rychlostí.
- Významnou roli hraje ale v případě kosmického záření a při provozu částicových urychlovačů.



Podíl BZ vůči energii spotřebované ionizací narůstá s:

1. energií záření (elektronů, pozitronů)
2. a zejména PROTONOVÝM ČÍSLEM (Z) ostřelovaného materiálu – **proporční Z^2** (Z udává i počet e- v elektronovém obalu → ↑Z znamená ↑ hustota e- → více interakcí)



Poměr ztráty energie e- prostřednictvím BZ oproti ionizaci/excitaci

Lze empiricky odhadnout jako **$E \cdot Z / 820$** ,

kde E = kinetická energie e- [MeV] a Z = protonové číslo absorbující látky

V případě biologických tkání (malé Z) tedy BZ nepříliš významné

3. **Hmotnosti částice** – p⁺ a α částice produkují <1/10⁶ množství BZ oproti e- se stejnou energií

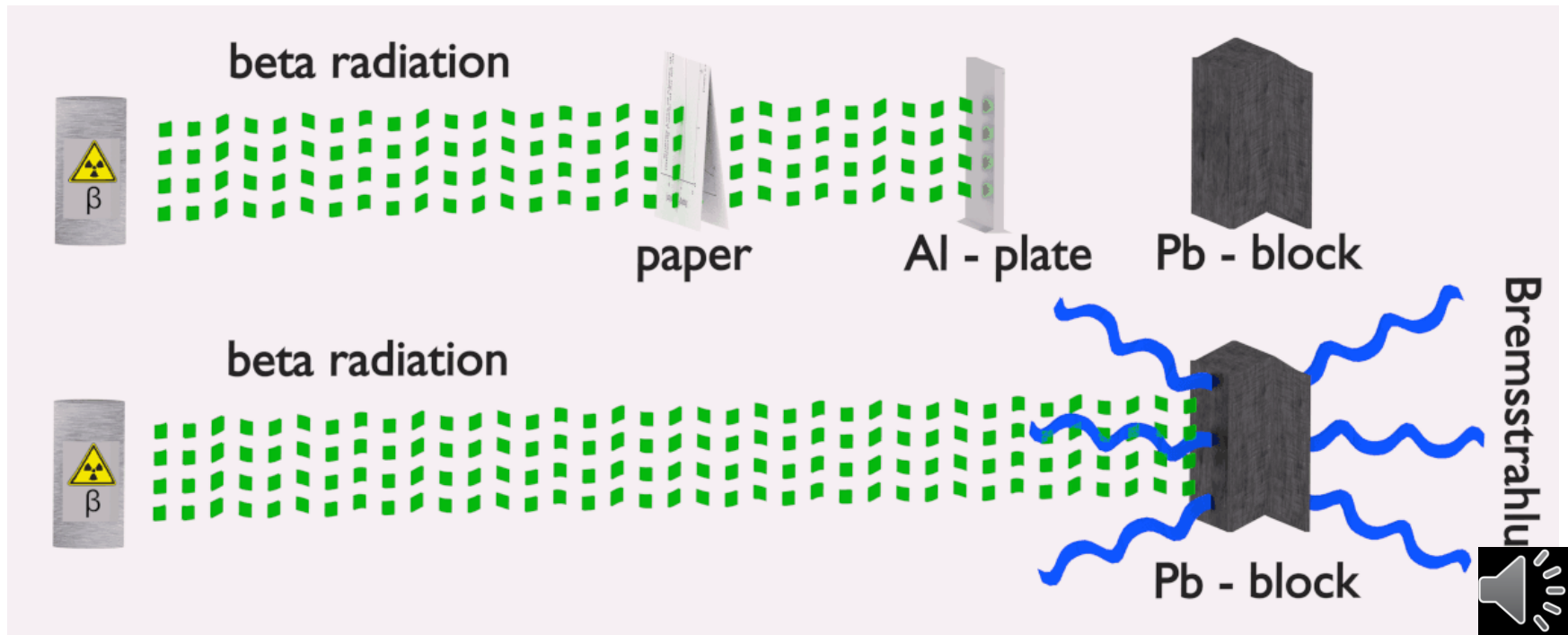


Na brzdné záření si musíme dávat **pozor i při stínění**

(viz přednáška o radiační ochraně)

Ke stínění paprsků γ se používají těžké materiály. Kdybychom toto učinili při stínění záření β , způsobili bychom si emisi ještě pronikavějšího brzdného záření (RTG/ γ).

Ke stínění β záření se proto využívají lehké materiály (např. plexisklo), případně za ním ještě vrstva olova na odstínění BZ (POZOR! – nesmí se obrátit)



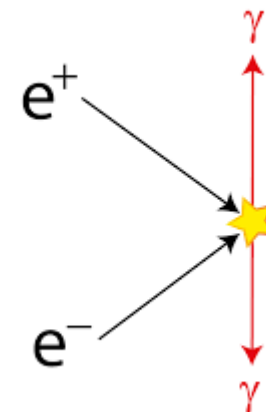
Interakce lehkých nabitých částic

3. ANIHILACE β^+

- letící pozitron ztrácí svou energii ionizací a na konci své dráhy nutně narazí na e^- .
- jedná se o interakci hmoty s antimotou → ANIHILACE: e^+ a e^- anihilují za vzniku dvou fotonů,



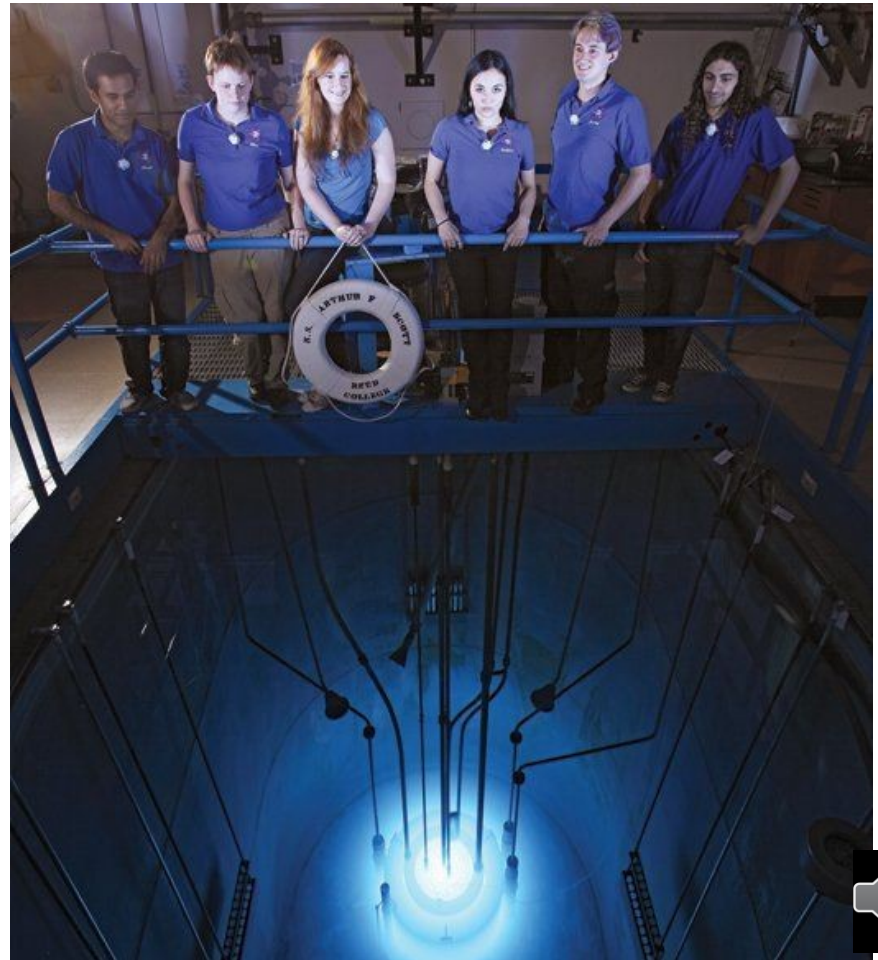
- energie gama fotonů je rovna hmotnosti anihilovaných částic (kinet. energie e^+ je totiž na konci dráhy téměř nulová).
- Dle $E=mc^2$ to představuje energii **511 keV** na každý foton



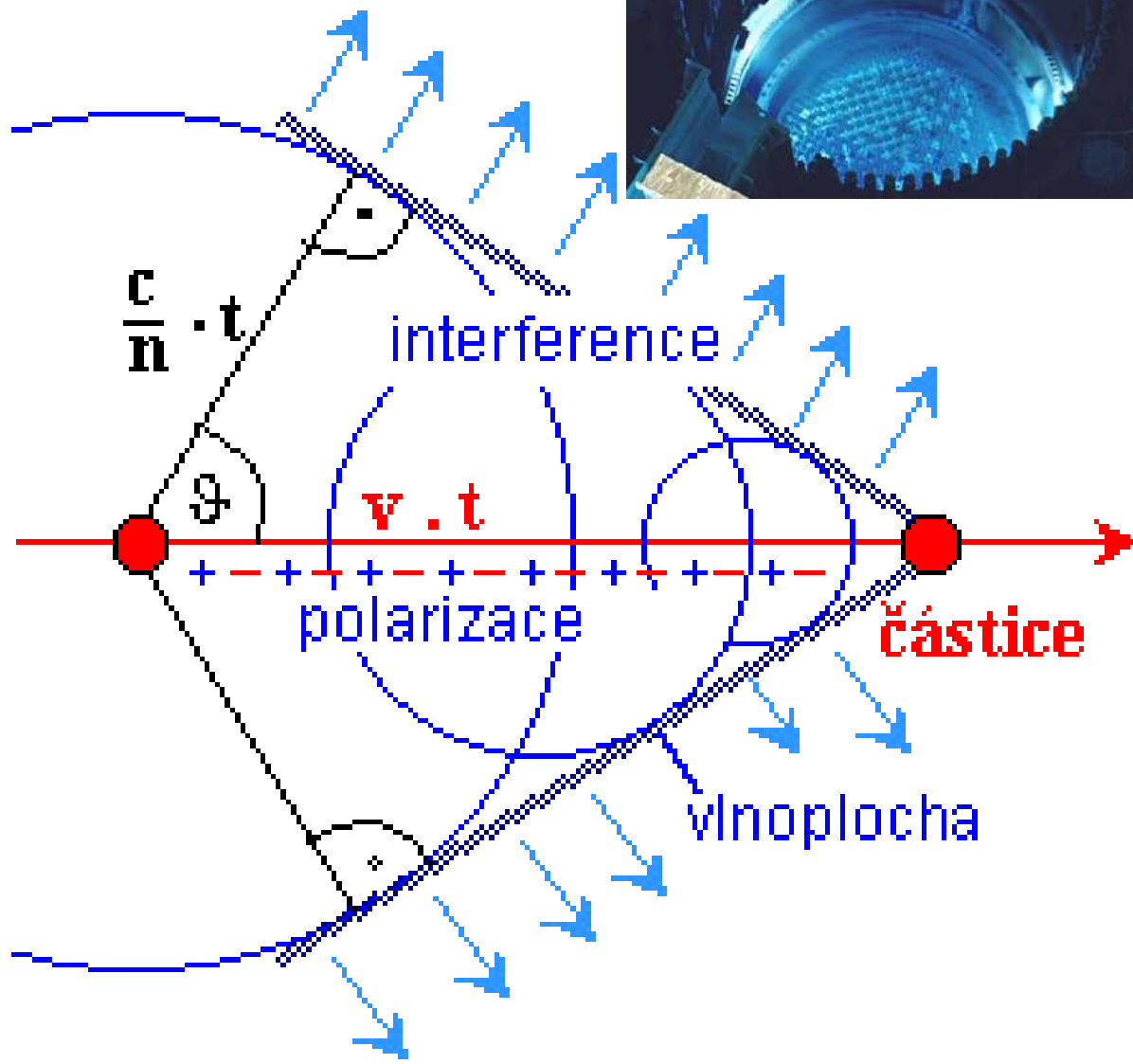
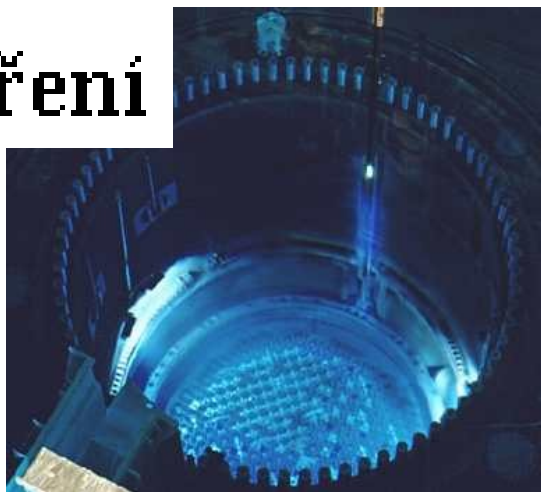
Interakce lehkých nabitých částic

4. VZNIK ČERENKOVOVA ZÁŘENÍ

- vzniká u energetičtějších beta částic v průhledném materiálu
- letící e^- v poli atomů a molekul na ně působí svým nábojem tak, že se natáčejí opačnými póly čímž od něho převezmou část energie.
- Po odletu e^- se **dipóly vrátí do původní polohy** a získanou energii vyzáří ve formě fotonů – **ČERENKOVOVA ZÁŘENÍ**



Čerenkovovo záření



Pokud e^- letí v daném materiálu rychleji než světlo (v materiálu je totiž světlo pomalejší než ve vakuu), vznikají vlnoplochy světelné energie, které mohou interferovat a zesilovat se –

... materiál je pak už nebude absorbovat a tuto energii bude odebírat záření, které je dokonce vidět (např. namodralá záře v bazénech s vyhořelým palivem)



Interakce nepřímoionizujícího záření

- **Nepřímoionizující** záření je záření, které nenese elektrický náboj – materiál tedy neionizuje přímo, nýbrž prostřednictvím produkce sekundárních (delta) elektronů
- Jedná se o:
 - **elektromagnetické záření (fotony):**
 - Paprsky gama
 - Rentgenovo záření
 - **Částice bez elektrického náboje:**
 - neutrony



INTERAKCE FOTONŮ

interakcí je celá řada, mezi nejdůležitější patří

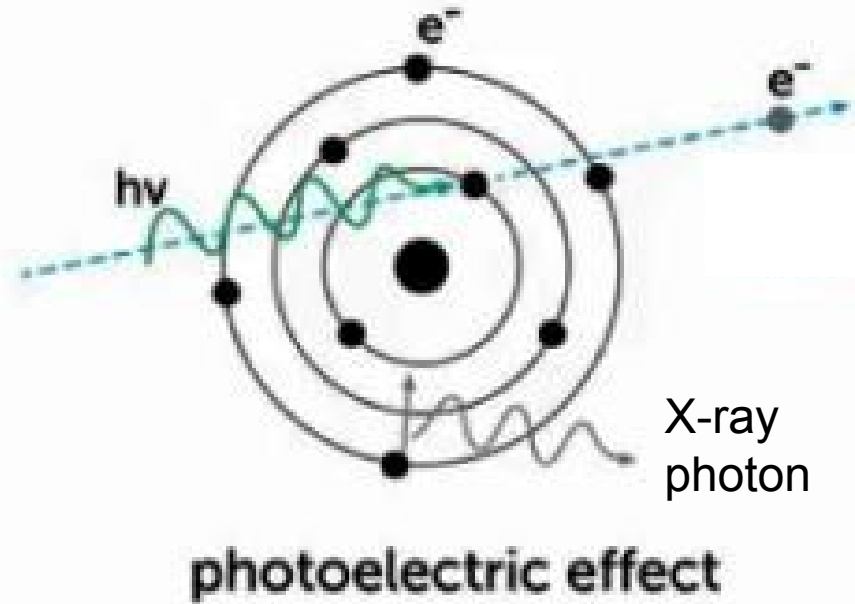
1. FOTOELEKTRICKÝ JEV – FOTOEFEKT

foton (γ) narazí na e^- , ten ho absorbuje a jeho energii převede na zvýšení své energie \rightarrow jeho vytržení z elektronového obalu

typické pro **nízkoenergetické záření**

FE nastává častěji u atomů $s \uparrow Z$, tj. u těžkých atomů (větší pravděpodobnost interakcí s e^-)

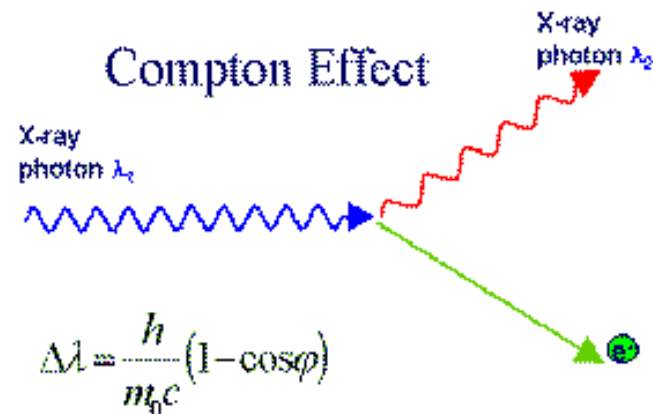
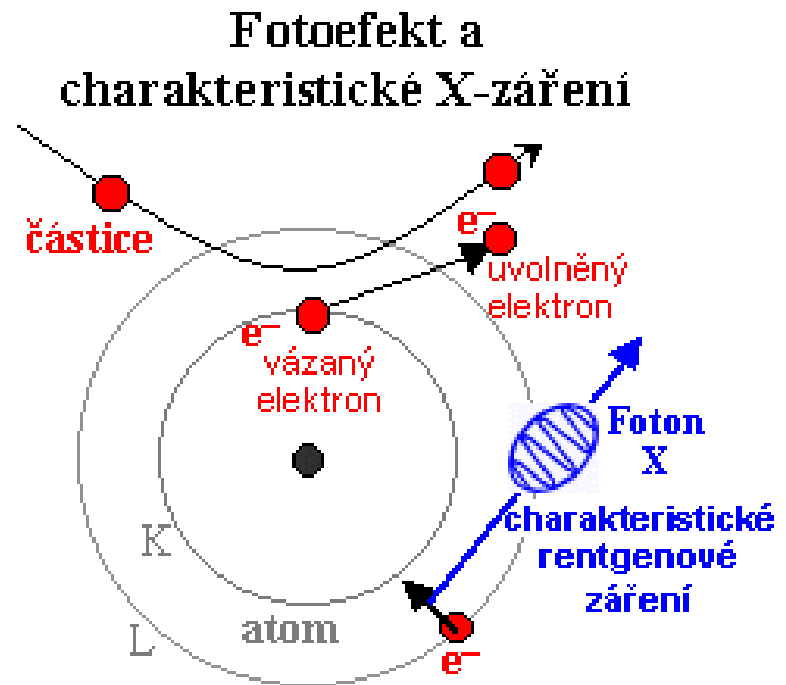
X-ray-matter interaction



INTERAKCE FOTONŮ

2. COMPTONŮV ROZPTYL

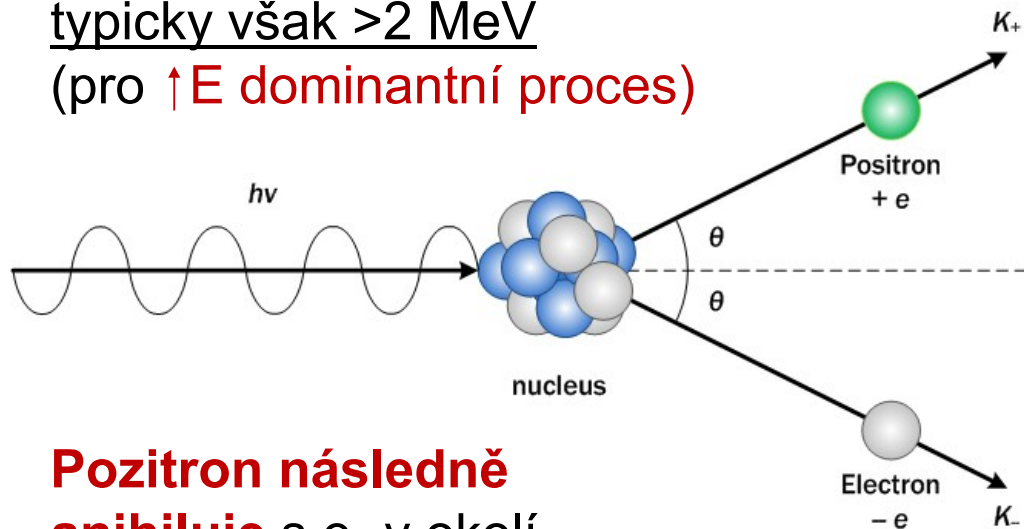
- obdoba fotoefektu ale na **vyražení e^-** z elektronového obalu je spotřebována jen část energie fotonu.
- **Zbytek energie je vyzářen ve formě fotonu s nižší energií** než měl původní foton. (tj. energii poníženou o energii předanou emitovanému elektronu)
- Typická interakce pro fotony s $E = 200 \text{ keV} - 2 \text{ MeV}$



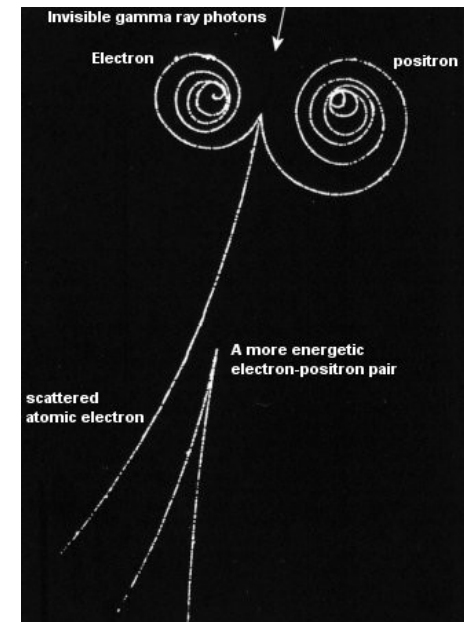
INTERAKCE FOTONŮ

3. TVORBA ELEKTRON-POZITRONOVÉHO PÁRU

- Foton se v blízkosti jádra (nabitě částice) zhmotní v elektron a pozitron (opačný proces k ANIHILACI pozitronu).
- → přeměna energie v hmotu
- Podmínkou je, že energie fotonu musí být větší než 1.02MeV (**$2 \times 0.511 \text{ MeV}$**) (nejnižší možná energie e^-),
- typicky však $>2 \text{ MeV}$ (pro $\uparrow E$ dominantní proces)



- **Pozitron následně anihiluje** s e^- v okolí

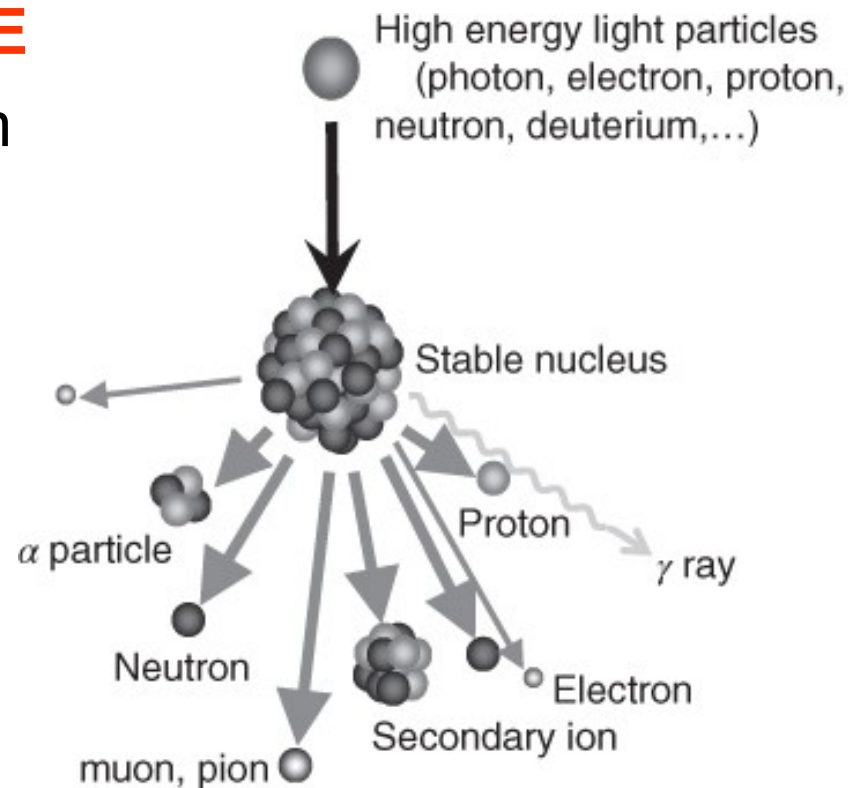


INTERAKCE FOTONŮ

4. FOTOJADERNÉ REAKCE

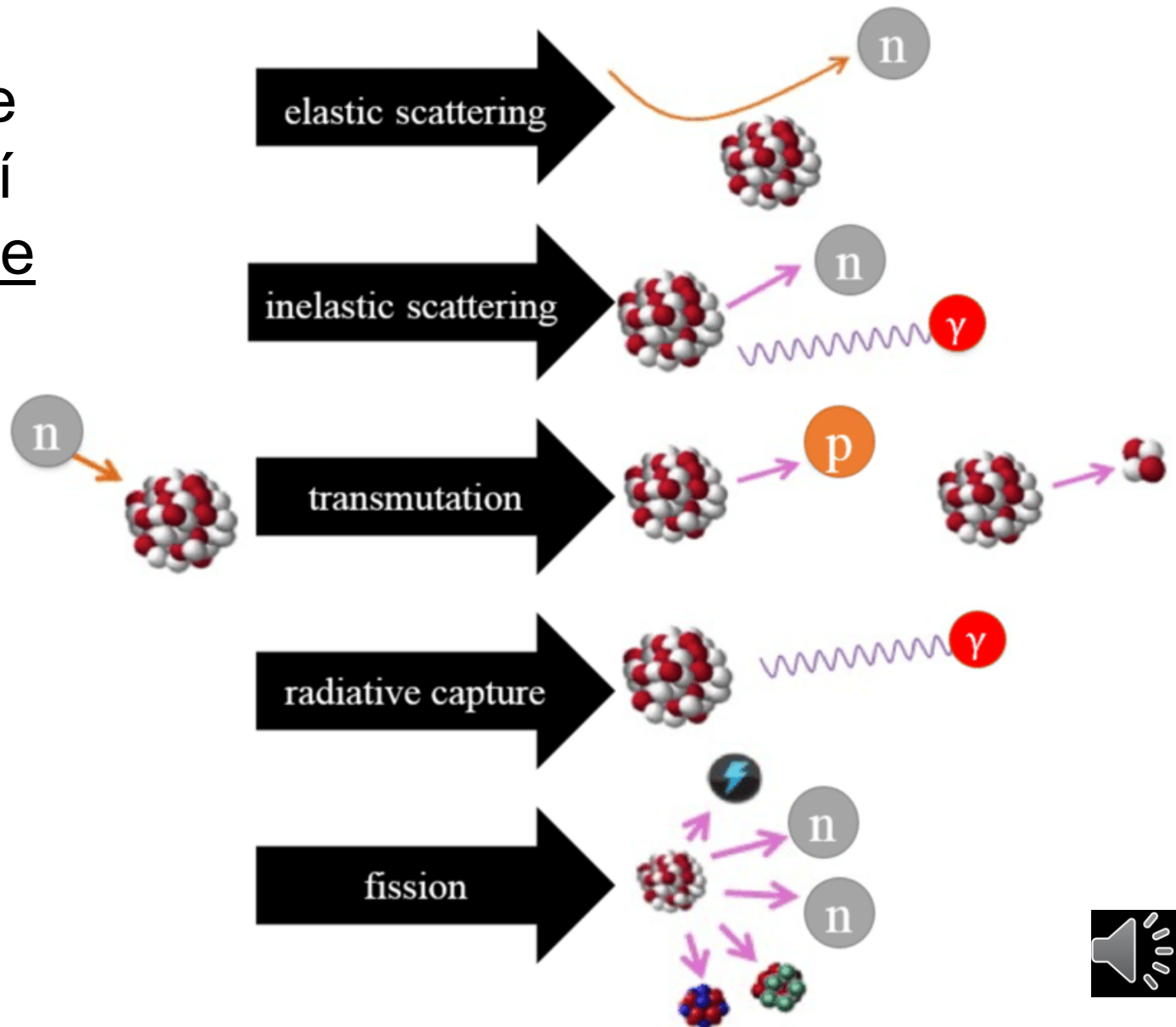
foton gama po absorpci jádrem
vyvolá emisi n^0 , p^+ , případně
i většího počtu částic

+ další méně
významné interakce

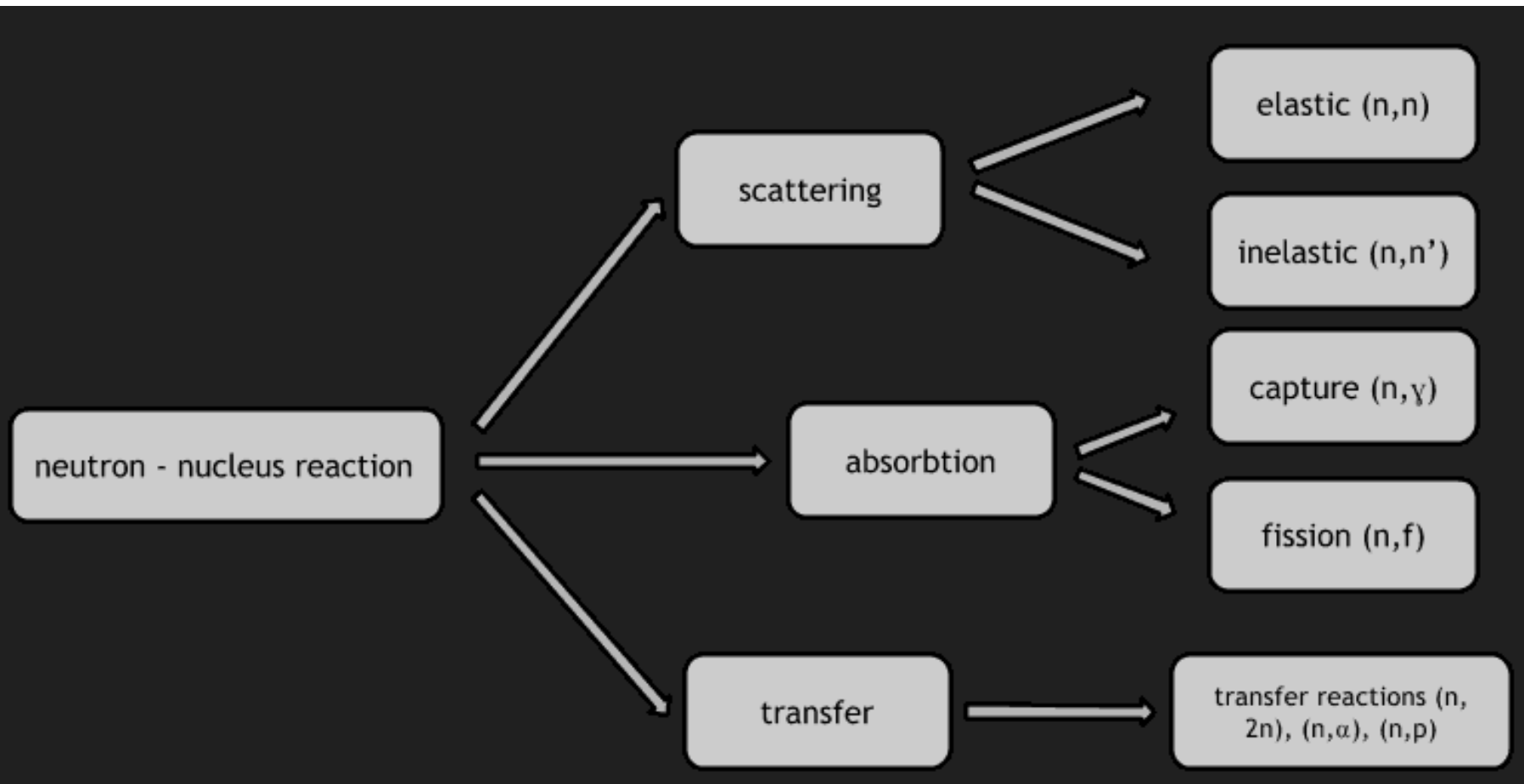


INTERAKCE NEUTRONŮ

Bez náboje
– interagují
proto pouze
s jádry
atomů, do
kterých
navíc díky
této
neutralitě
mohou
pronikat



INTERAKCE NEUTRONŮ



INTERAKCE NEUTRONŮ

1. ROZPTYL NEUTRONU NA JÁDŘE

– PRUŽNÝ ROZPTYL (n,n)

- K PR dochází na velmi malých jádrech, která se svou velikostí blíží neutronu (nejúčinnější jsou v tomto směru tedy jádra vodíku = $1p+$)
- Neutron předá část své energie jádru a odražený pokračuje dále se zbytkem energie (zjednodušeně se jedná o obdobu srážky dvou kulečnickových koulí)
- Energie, předaná neutronem jádru se **celá** přemění na kinetickou energii jádra („rozkmitá ho“).
- Děj pokračuje dokud se neutron nezpomalí natolik, že může být absorbován jádrem.
- PR tak způsobuje zpomalení (moderaci) neutronů, již se využívá při stínění neutronů a v atomových reaktorech za účelem podpory jaderné reakce.



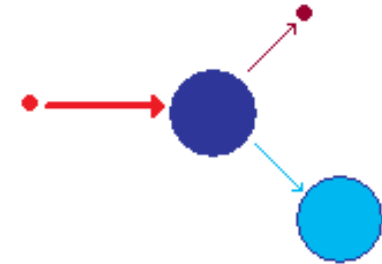
INTERAKCE NEUTRONŮ

1. ROZPTYL NEUTRONU NA JÁDŘE

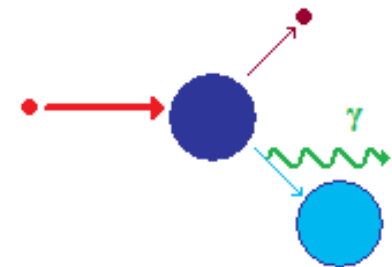
– NEPRUŽNÝ ROZPTYL (n, n')

- K **nepružnému rozptylu** dochází na rozdíl od PR na jádrech těžkých prvků
- Neutron, obdobně jako při pružném rozptylu, předá část své kinetické energie jádru a jako zpomalený pokračuje dál. Vzhledem k poměru hmotností n_0 a těžkých jader je však zpomalení n_0 méně účinné než při PR
- Část energie předané neutronem jádru se opět přemění na kinetickou energii jádra, zároveň se ale jádro excituje (zvýší se potenciální energie), což následně vede k vyzáření fotonu γ

pružný rozptyl



nepružný rozptyl



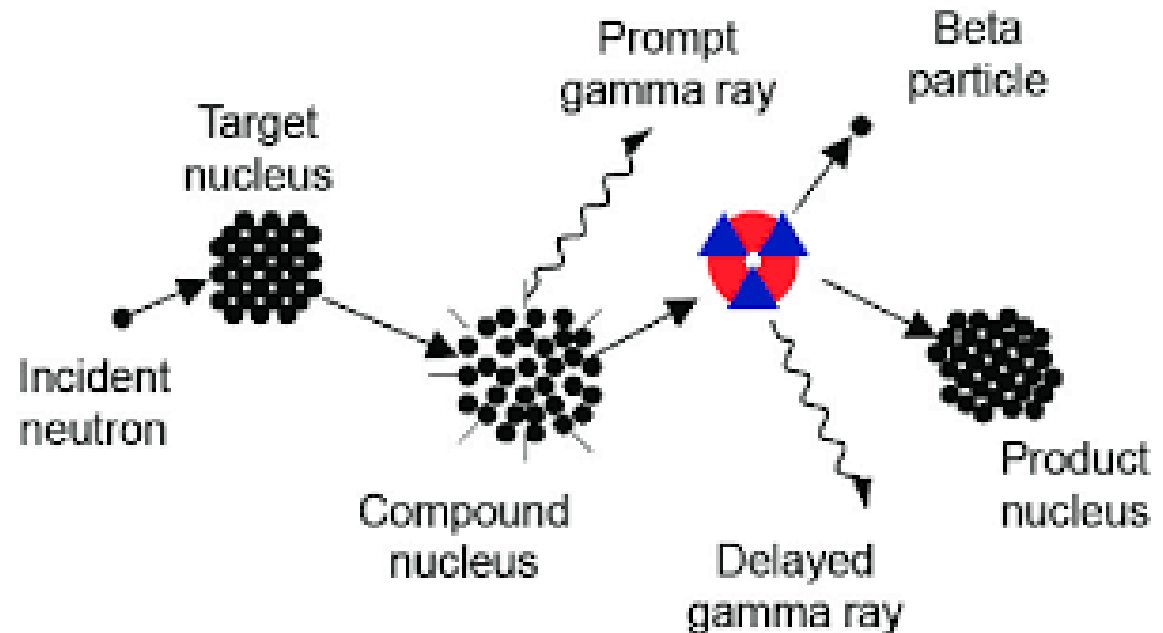
INTERAKCE NEUTRONŮ

2. ZÁCHYT NEUTRONU JÁDREM

- **RADIAČNÍ ZÁCHYT (n,γ) neutronu**

n^0 je zachycen jádrem a jeho energie se předá jádru ve formě zvýšení jeho potenciální energie.

K deexcitaci jádra pak dochází vyzářením fotonu gama, jádro se přemění na nuklid s $N+1$, ten může být stabilní nebo radioaktivní



INTERAKCE NEUTRONŮ

2. ZÁCHYT NEUTRONU JÁDREM

- **Neutronové jaderné reakce s emisí nabitých částic**

n^0 je zachycen jádrem ze kterého je emitována částice (alfa, p^+ , n^0 + p^+ apod.)

- **ŠTĚPENÍ JADER (n,f)**

n^0 je zachycen jádrem, které se následně rozštěpí na dvě přibližně stejně velké částice, které jsou vždy radioaktivní

