

Radiační biofyzika

Přednáška 7 2023

- **Interakce IZ**
- **Jednotky v radiační biofyzice, dosimetrii a radiační ochraně**

Martin Falk



Interakce IZ s hmotou

I. FYZIKALNÍ INTERAKCE

V zásadě rozlišujeme

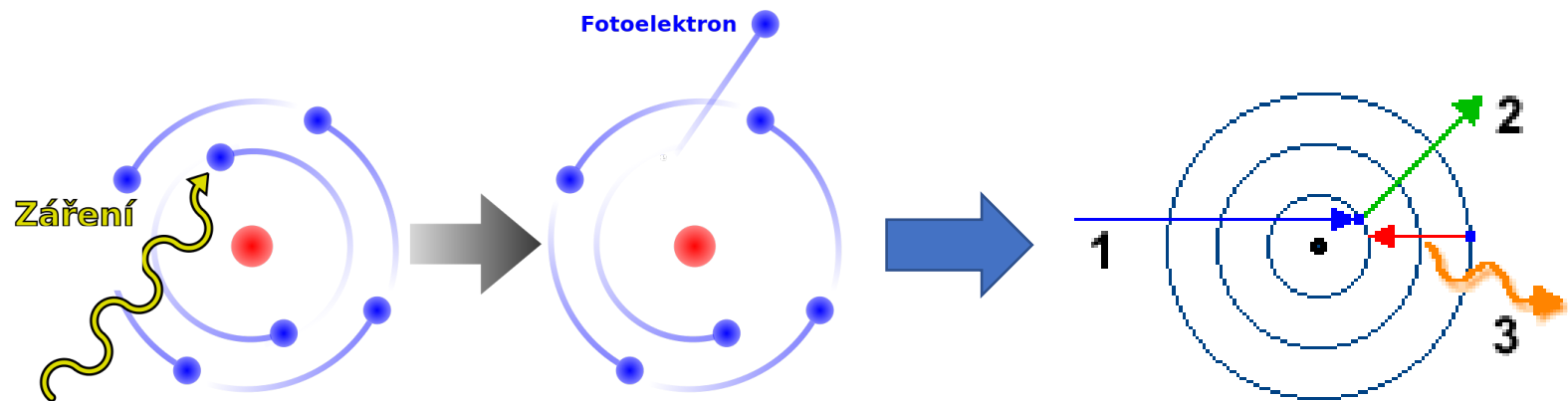
- 1. Interakce přímo ionizujícího záření
 - 1A: Interakce **těžkých** nabitých částic
 α částice, p^+ , štěpné trosky vzniklé při štěpení uranu ap.
 - 1B: Interakce **lehkých** nabitých částic
 β^- (elektrony), β^+ (pozitrony)
- 2. Interakce nepřímo ionizujícího záření
 - 2A: Interakce **fotonů** γ , RTG
 - 2B: Interakce **neutronů**



1. Interakce přímo ionizujícího (tj. nabitého) záření

1.1. IONIZACE

- Přímo ionizovat mohou nabité “částice” (e^- , α -částice, urychlené ionty). Ty při průchodu látkou ztrácí svou kinetickou energii převážně **coulombovskou (elektrickou) interakcí s elektrony** v atomech látky (obráceně definice → přímo ionizující záření je takové záření, které je schopné při svém průletu hmotou látku přímo ionizovat).



1.1 IONIZACE

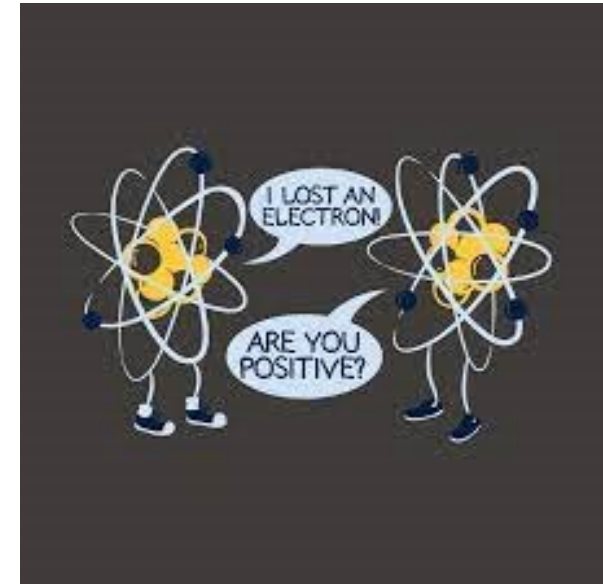
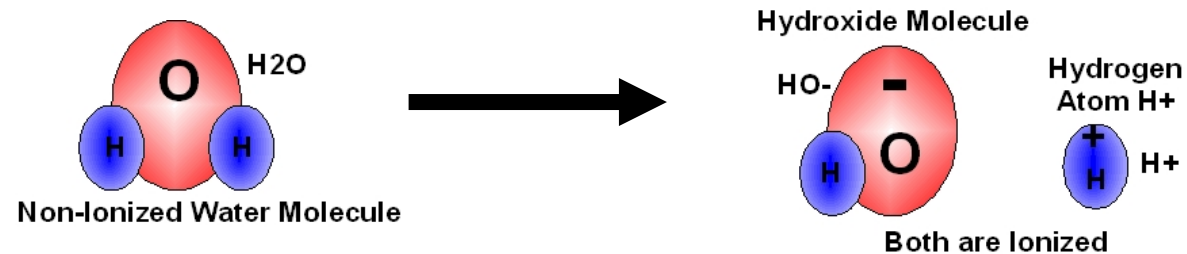
Minimální energetická podmínka ionizace

- Minimální energie potřebná k ionizaci ve vodném prostředí (cytoplazma) je **33 eV**
- Vztah mezi energií incidentního fotonu a jeho 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 dříve)**
- To odpovídá záření s vlnovou délkou **<40 nm**, tedy kratší než přísluší ultrafialovému záření → Jedna z možných definic IR = záření s $E > 40 \text{ nm}$

1.1. IONIZACE

- Základní interakcí přímo ionizujícího záření je tak **IONIZACE/EXCITACE**
→ Právě tento projev dal IZ jeho 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**.

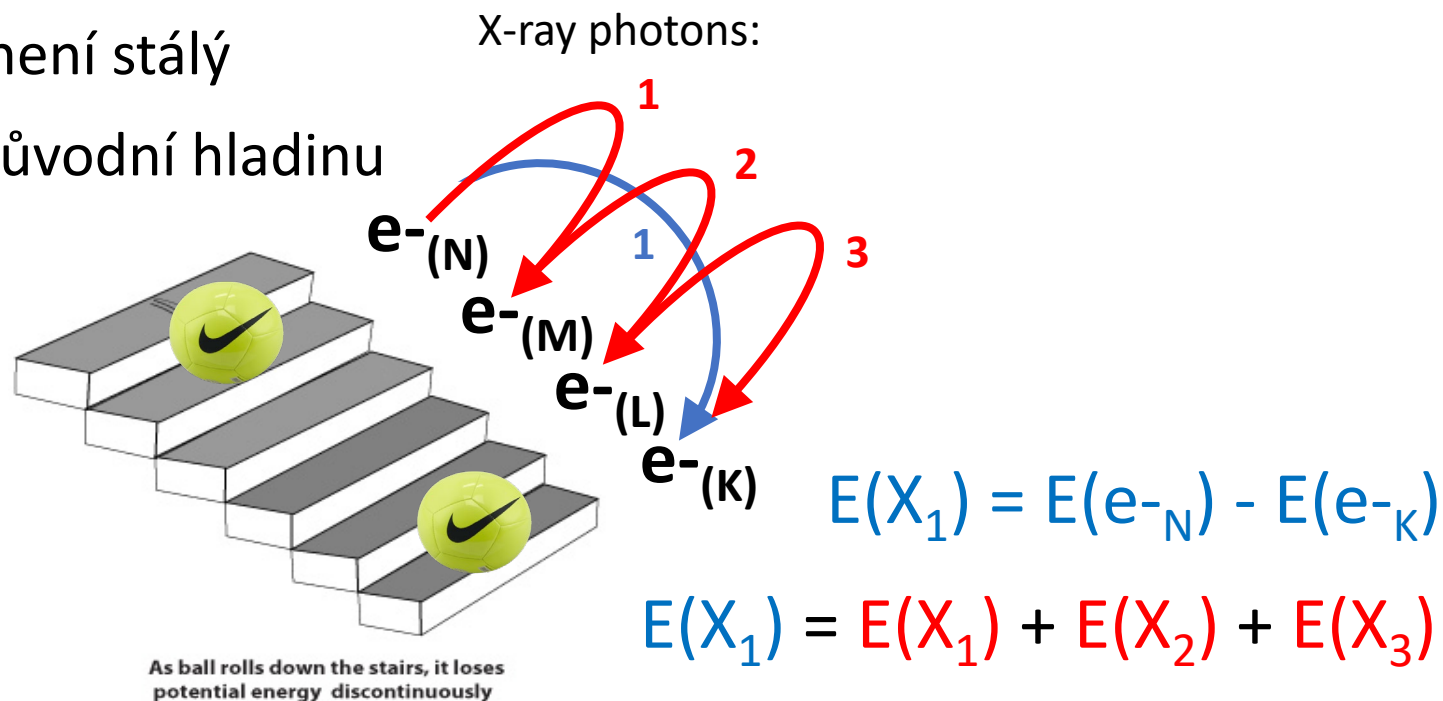
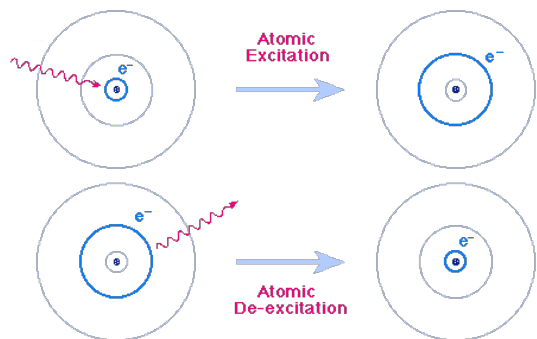


- reakcemi s e^- vznikají záporně nabitě **anionty**
- **ionty jsou velice reaktivní** a vedou k celé řadě chemických reakcí → POŠKOZENÍ BIOMOLEKUL

1.2. 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** (vzdvžení e⁻ na vyšší energetickou hladinu) – tj. **excitaci** atomů.

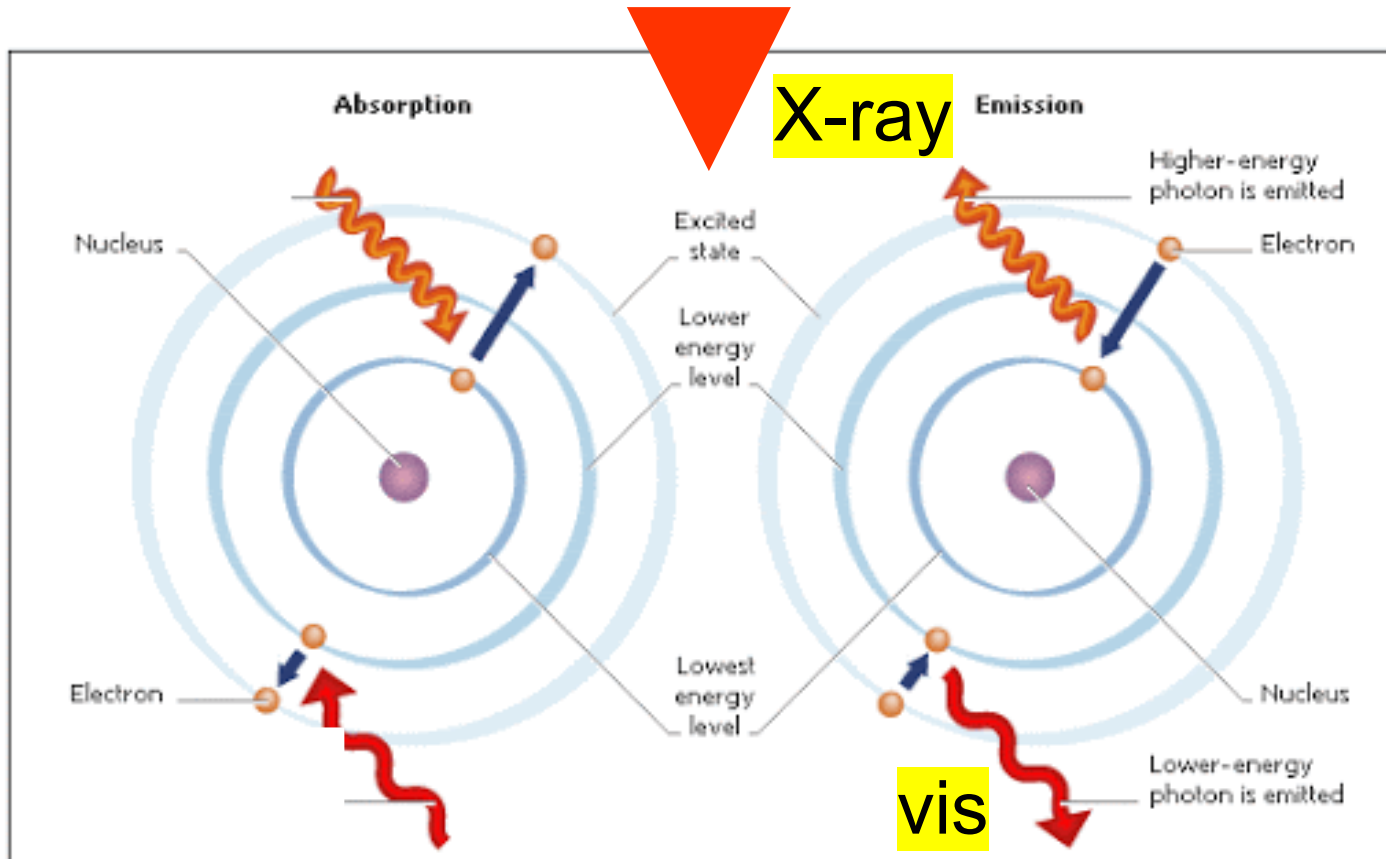
- Excitovaný (vzbuzený) stav atomu není stálý
 - vzápětí přeskočí elektron zpět na původní hladinu
 - nastane **deexcitace**,



- 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**

Deexcitace – Emise fotonů (X / vis.)

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



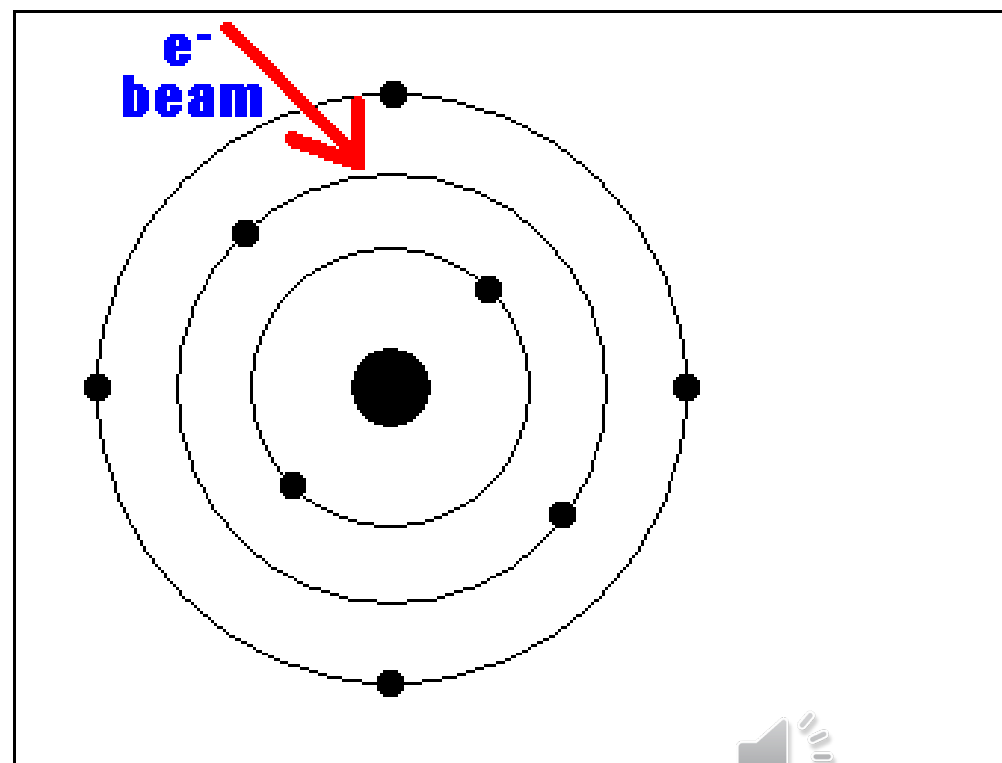
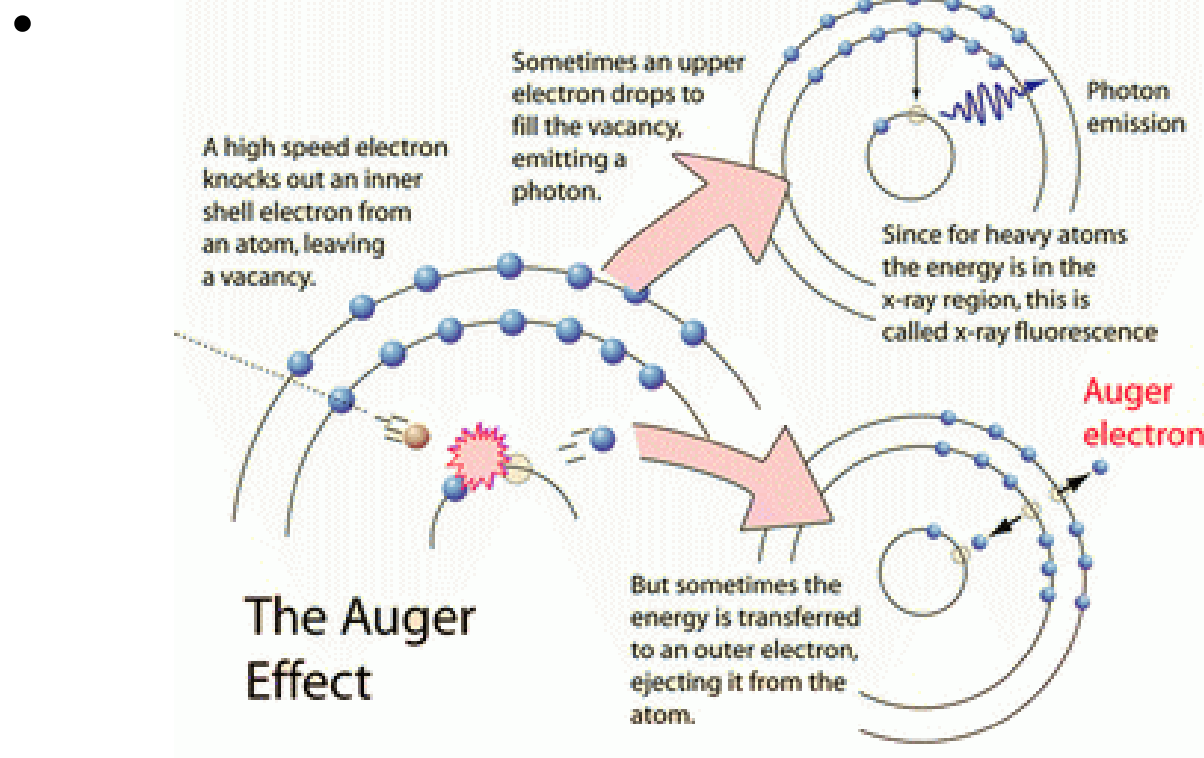
- Pro srovnání: Neionizující záření **není** (z logiky věci) **schopno ionizovat a excitovat** absorbující hmotu.
- Energie stačí pouze ke změně vibračního či rotačního stavu molekuly
- **Absorpce** energie neionizujícího záření v látce **nemá kvantový charakter**



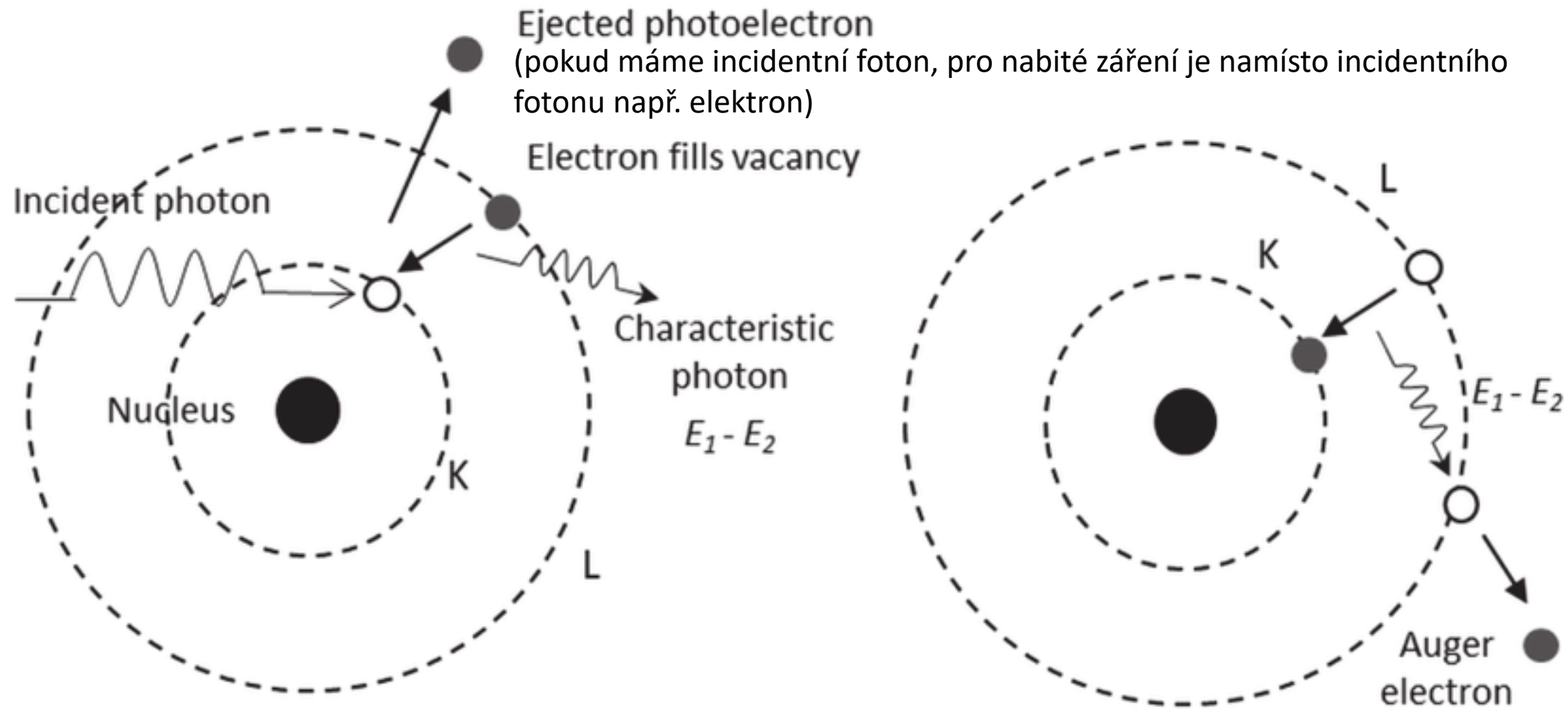
Deexcitace – Emise elektronů

- 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“ – **Augerův efekt**

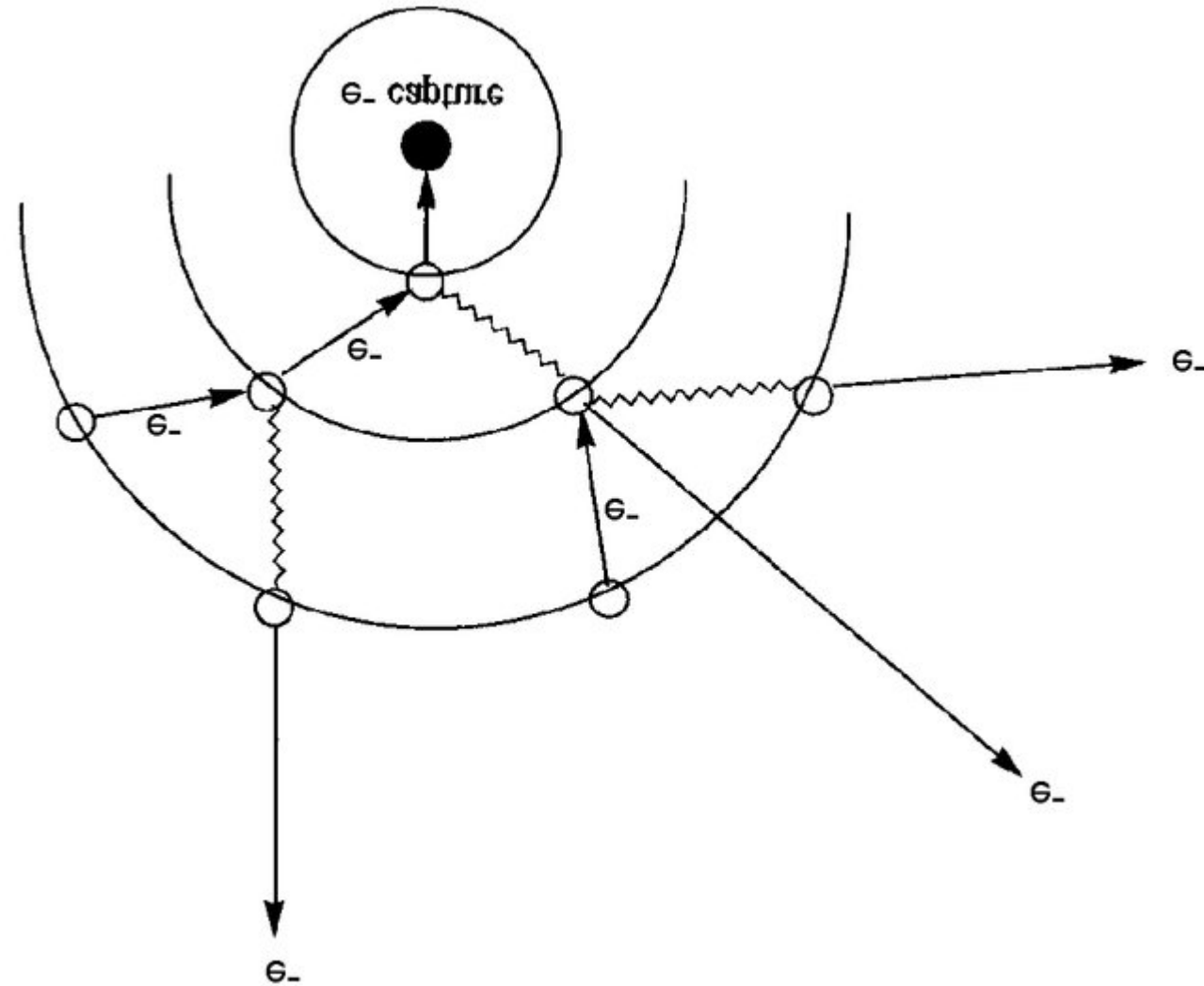


Augerův efekt



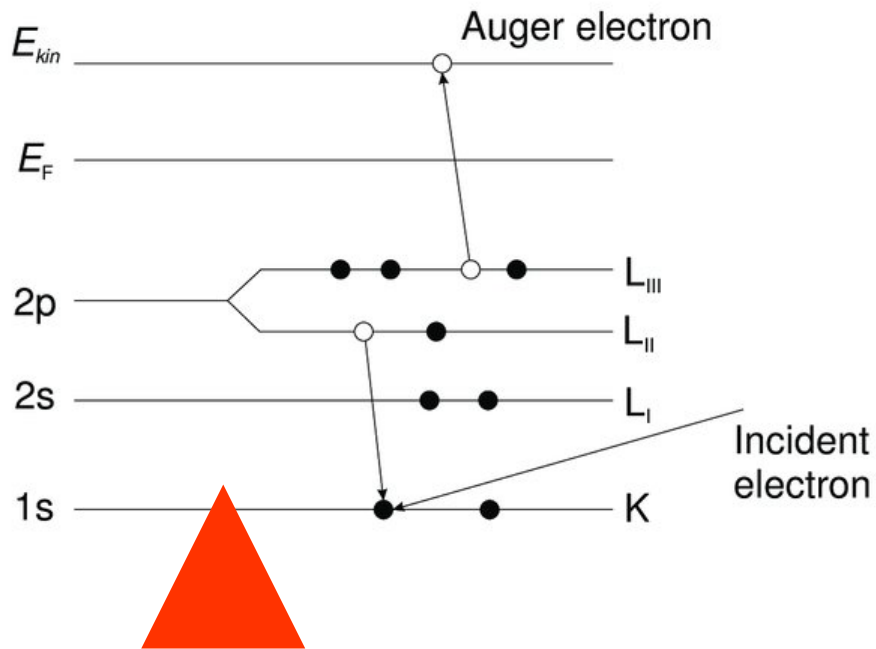
Kaskády Augerových elektronů

Auger cascade following electron-capture decay

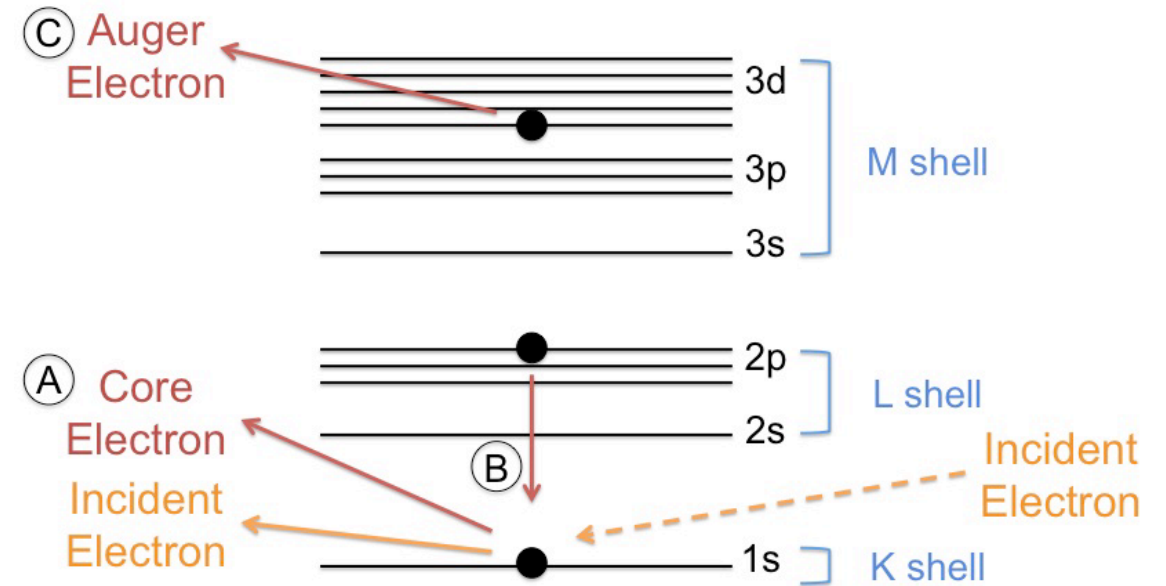


Augerův efekt - Nomenklatura

KLL Auger transition



KLM Auger transition

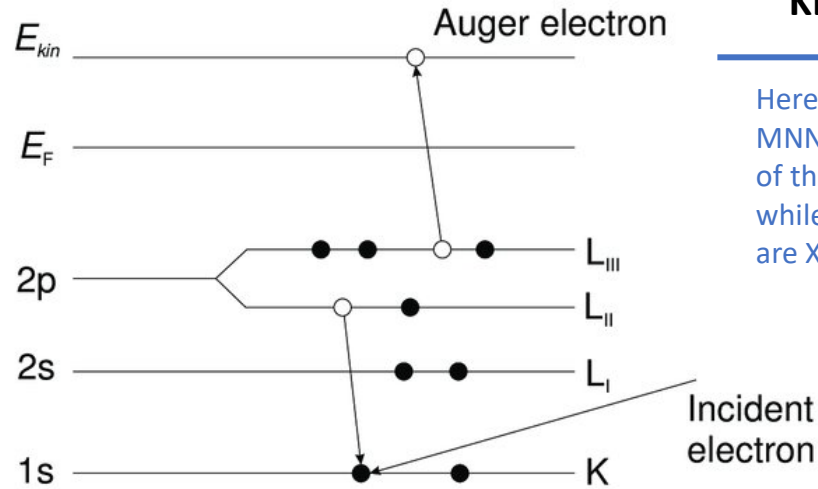


EMISE AUGEROVA ELEKTRONU: Nejdříve se vytvoří díra emisí fotoelektronu nebo sekundárního elektronu z vnitřní hladiny, např. K.

Díra je potom zaplněna elektronem z vyšší hladiny, zde z hladiny L2.

Uvolněná energie je předána dalšímu elektronu, v našem případě na hladině L3. Tento elektron nesoucí označení podle elektronových hladin zahrnutých v dané Augerově transici KL1L3 je následně emitován

Augerův efekt – Pravděpodobnost oproti X-ray emisi



KLL Auger transition

Here KLL, LMM, and MNN are various forms of the Auger transition, while $K\alpha$, $L\alpha$, and $M\alpha$ are X-ray processes.

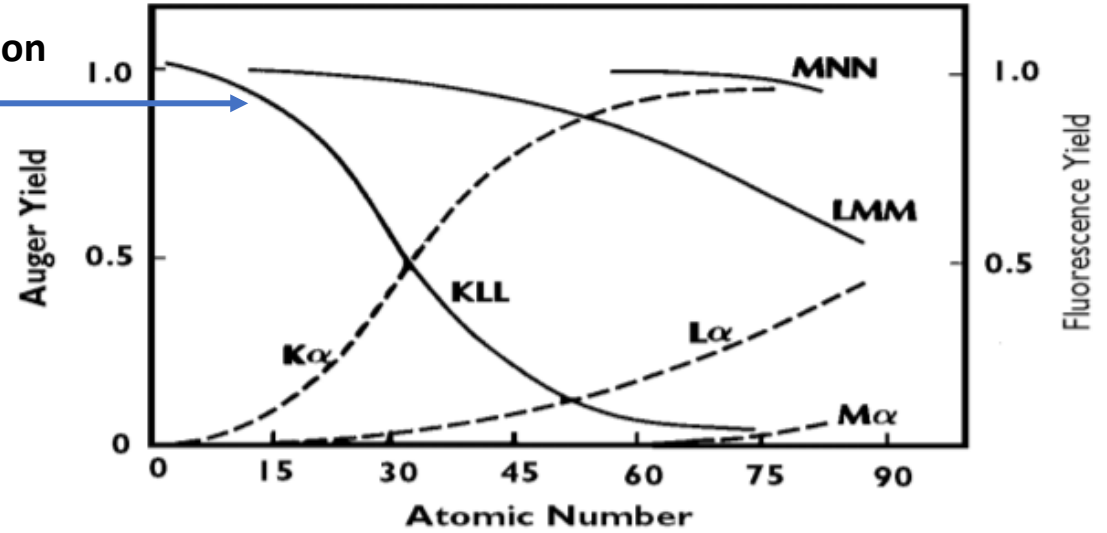
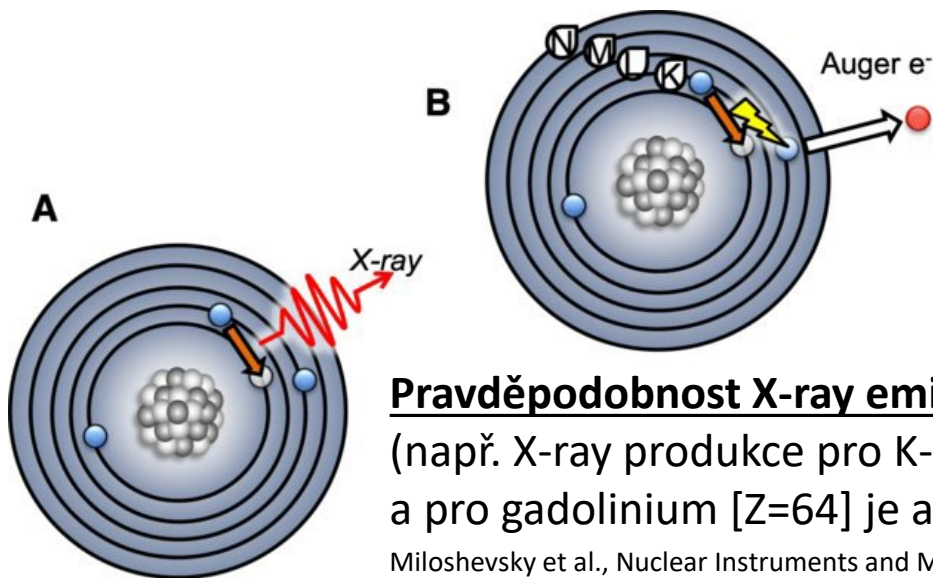


Fig. 2.5 : Relative probabilities of X-ray fluorescence and Auger emission.



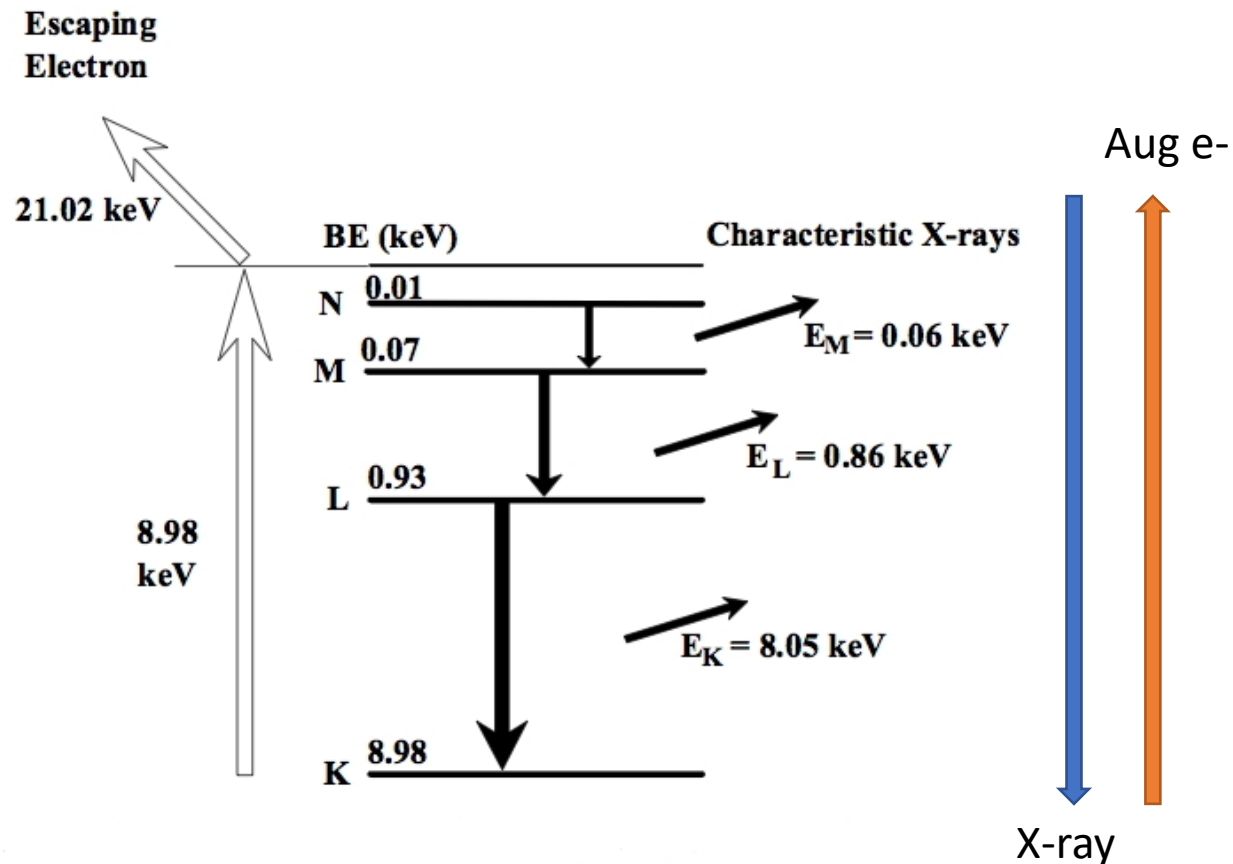
Pravděpodobnost emise Augerových elektronů

- klesá se Z prvku (e- jsou méně pevně vázány v obalu a mohou se též snadněji uvolnit z obalu díky jeho menší „tloušťce“)
- roste s klesajícím rozdílem mezi energetickými stavy slupek

Pravděpodobnost X-ray emise naopak roste se Z^4

(např. X-ray produkce pro K-L1(L2) pro uhlík [Z=6] je 0,26 %, pro dusík [Z=7] 0,6 %, pro kyslík [Z=8] 0,92 % a pro gadolinium [Z=64] je asi 93,4 %, tj. pravděpodobnost Augerova procesu pro gadolinium je nízká.)

Augerův efekt – Pravděpodobnost oproti X-ray emisi



- The probability of radiative transitions drops with decreasing energy.
- For this reason, the X-ray fluorescence yield decreases significantly with increasing the shell number.
- For gadolinium, the X-fluorescence yield from the L shell is less than 20 % and from the M shell it is less than 1 %.

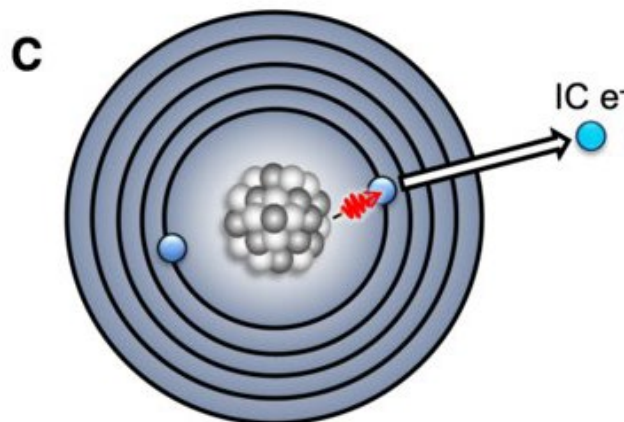
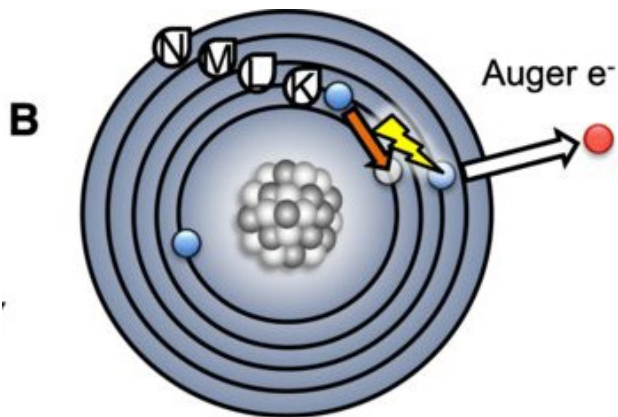
The removal of a K-shell electron from a copper atom and the subsequent de-excitation process

(https://en.wikibooks.org/wiki/Basic_Physics_of_Digital_Radiography/The_Basics)

Miloshevsky et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 192 (2002) 360–364

Augerův efekt – „INTERNÍ“ PŘÍČINY

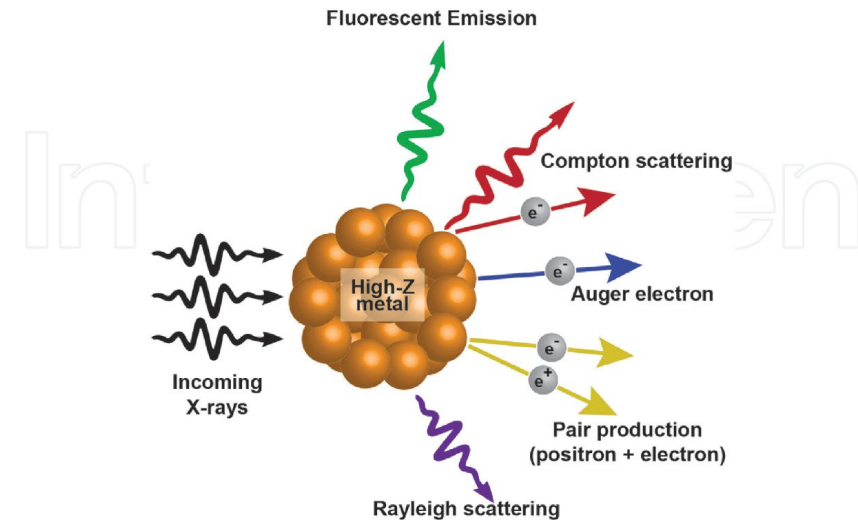
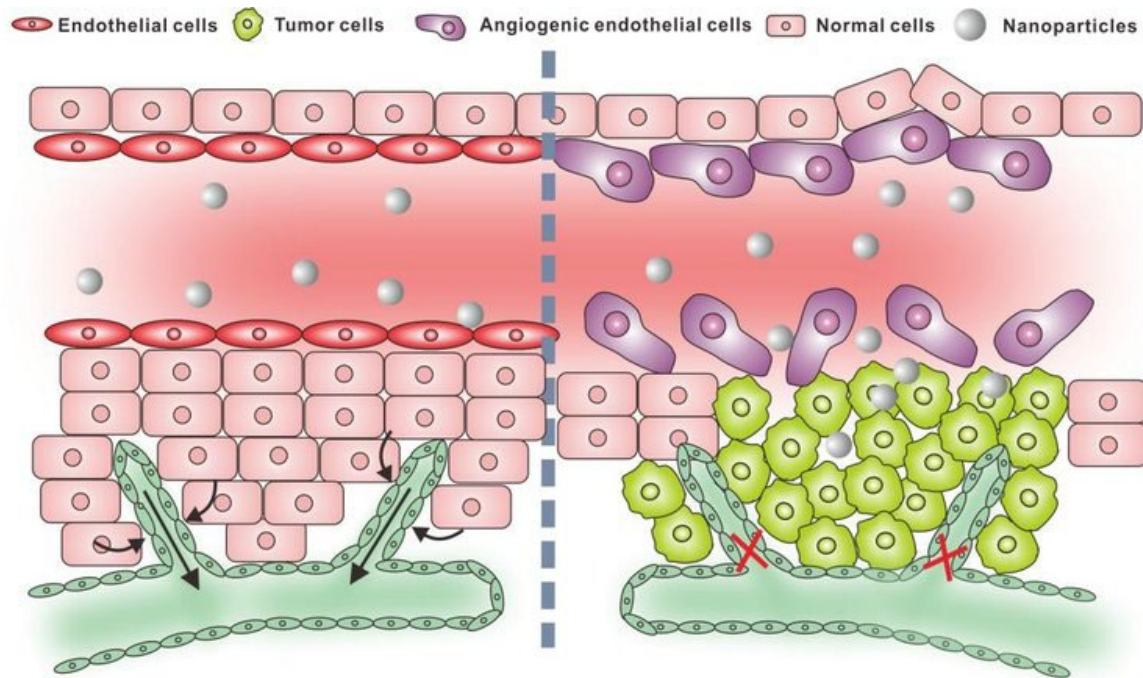
EXISTUJÍ I „INTERNÍ“ PŘÍČINY AUGEROVA EFEKTU...



- Kromě účinků „externích“ fotonů/elektronů může být Augerova emise **iniciována elektronovým záchytem (EC)** nebo **vnitřní konverzí (IC)**.
- Při EC zachytí protony vnitřní orbitální elektron (K), což vede ke vzniku elektronové díry.
- IC e- vzniká při deexcitaci nestabilních jader. Emitovaný γ -foton předává energii na vnitřní e-, čímž dochází k jeho uvolnění
- Následuje zaplnění elektronové díry přeskokem e- z vyšší energetické hladiny obalu a emisí X-ray
- I toto záření může podlehnout vnitřní konverzi a emisí formou Augerových e-.

Augerův efekt – Aplikace

- U těžkých prvků (vysoké Z) může být těchto e- třeba až 20 → elektronové „spršky“
→ **KOVOVÉ NANOČÁSTICE JAKO RADIOSENSITIZÁTORY V MEDICÍNĚ**
- 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)

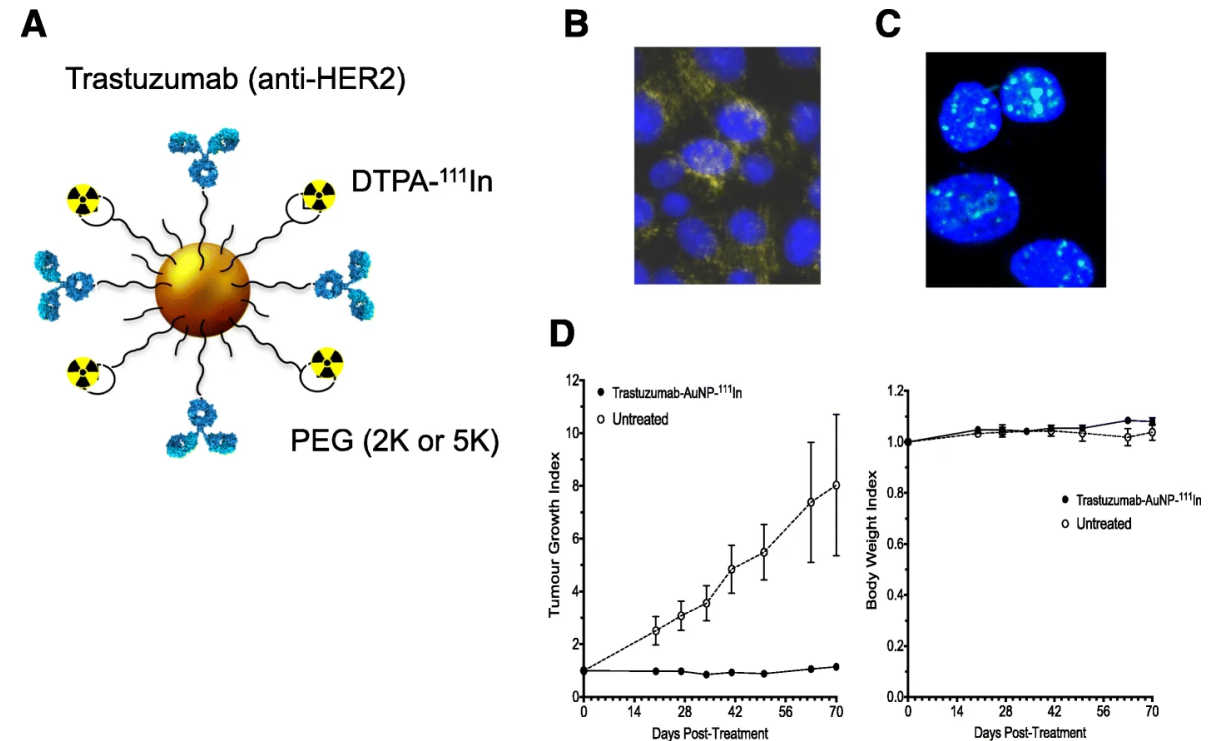


Schematic illustrating potential interactions of incident photons with a gold atom or other high-Z materials [10]. Source: <http://tcr.amegroups.com/article/view/1550/html>. AME Publishing Company. Republished with permission of Pioneer Bioscience Publishing Company, from D. Kwatra et al., Translational Cancer Research, 2(4), pp. 332, 2013; permission conveyed through Copyright Clearance Center, Inc.

- Augerův jev je také např. základem [Augerovy elektronové spektroskopie](#)

Augerův efekt – Aplikace

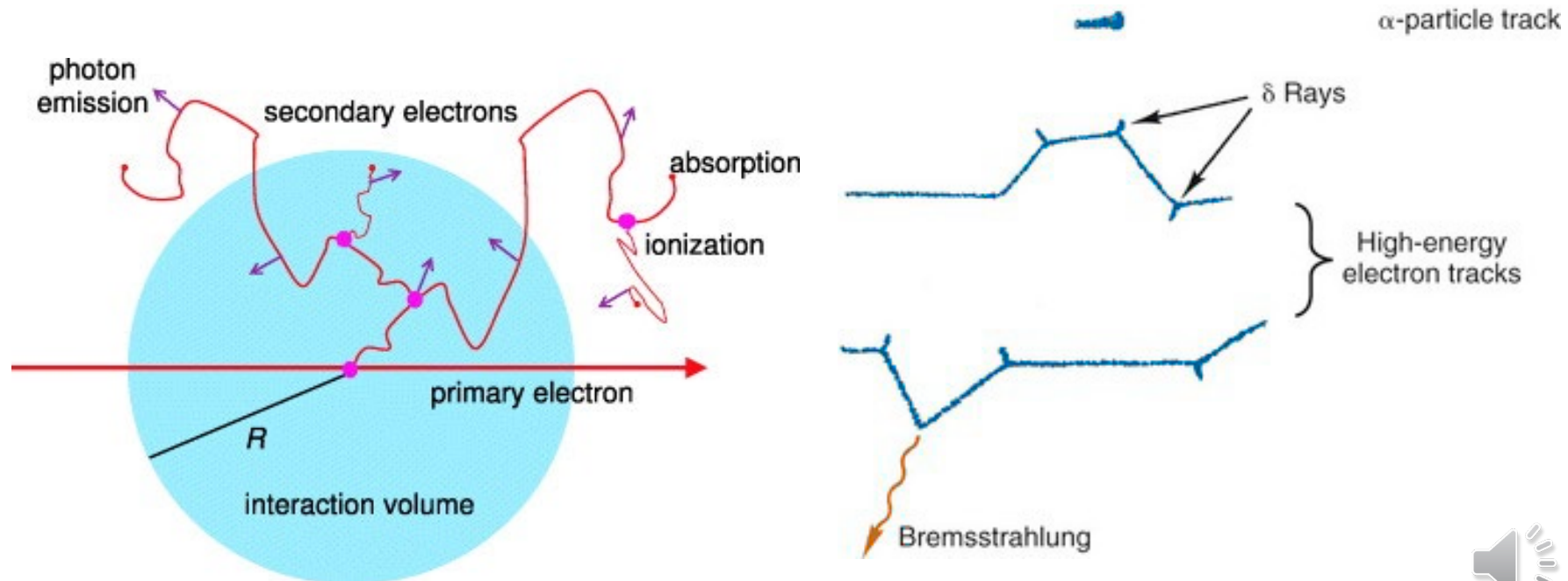
- Auger electrons (AEs) are very low energy electrons...
- ... that are emitted by radionuclides that decay by electron capture (e.g. ^{111}In , ^{67}Ga , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, $^{195\text{m}}\text{Pt}$, ^{125}I and ^{123}I).
- This energy is deposited over nanometre-micrometre distances, resulting in high linear energy transfer (LET) that is potent for causing lethal damage in cancer cells.
- Thus, AE-emitting radiotherapeutic agents have great potential for treatment of cancer.



a ^{111}In -trastuzumab-AuNPs are an example of an Auger electron (AE)-emitting radiation nanomedicine composed of gold nanoparticles (AuNPs; 30 nm) modified with 2 kDa polyethylene glycol (PEG) chains to stabilise the AuNPs and longer 5 kDa PEG chains conjugated to trastuzumab to bind HER2 or to DTPA to complex ^{111}In . **b** Dark-field and fluorescence microscopy demonstrating peri-nuclear localisation (nucleus is stained blue with DAPI) of ^{111}In -trastuzumab-AuNPs (yellow) in HER2-positive SK-BR-3 human breast cancer cells likely mediated by an endogenous nuclear localisation sequence (NLS) peptide in HER2. **c** DNA double-strand breaks (DSBs; bright foci) detected by immunofluorescence for γH2AX in the nucleus of SK-BR-3 cells exposed to ^{111}In -trastuzumab-AuNPs mediated by emission of AEs by ^{111}In . **d** Local intratumoural (i.t.) injection of ^{111}In -trastuzumab-AuNPs (10 MBq) in athymic mice with subcutaneous HER2-positive MDA-MB-361 human breast cancer xenografts arrested tumour growth compared to untreated mice (left panel) with no change in body weight (right panel) indicating no generalised normal tissue toxicity (Cai et al. [2016](#))

PRIMÁRNÍ A SEKUNDÁRNÍ 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 – LINEÁRNÍ PŘENOS ENERGIE (LPE / LET)

- 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 – Linear Energy Transfer)**
- anglická zkratka **LET**, se používá patrně častěji a preferuji ji i dále v prezentacích



IONIZACE – LINEÁRNÍ PŘENOS ENERGIE (LPE / LET)

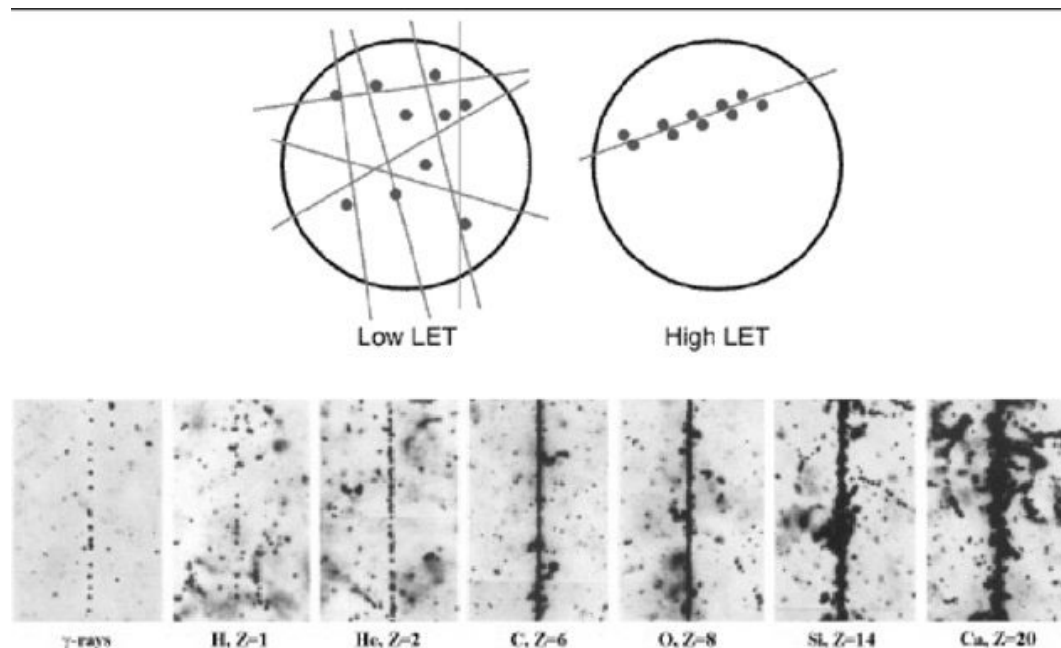
- **Shrneme-li uvedené, je LET**



- přímo úměrný náboji částice a elektronové hustotě látky ($q \cdot \rho \cdot Z$)
- a nepřímo úměrný čtverci rychlosti částice ($1/v^2$), tedy:

Přesná hodnota je dána tzv. **Betheho vzorcem**, v němž je zahrnut i střední excitační potenciál atomů látky, přibližně úměrný protonovému číslu Z .

$$\leftarrow -dE/dx \sim q \cdot \rho \cdot Z / v^2 \text{ [keV}/\mu\text{m}]; \leftarrow$$



LET (Linear Energy Transfer) **vyjadřuje velikost energie předané ionizující částicí na jednotku délky její dráhy** v daném prostředí. Vyjadřuje se obvykle v keV/ μ m.

IONIZACE – LINEÁRNÍ PŘENOS ENERGIE (LPE / LET)

$$L_{\Delta} = \left(\frac{dE}{dl} \right)_{\Delta}$$

[J.m⁻¹]

v radiobiologii častěji

[keV.μm⁻¹]

L - lineární přenos energie;

dl - vzdálenost, kterou ionizující částice prošla;

dE - ztráta energie nabitě částice v důsledku srážek s elektrony při jejím průchodu vzdáleností v látce a přenosem energie menším než je určitá omezující hodnota *D* .

Vysoký LPE: [částice α](#), [protony](#) ...

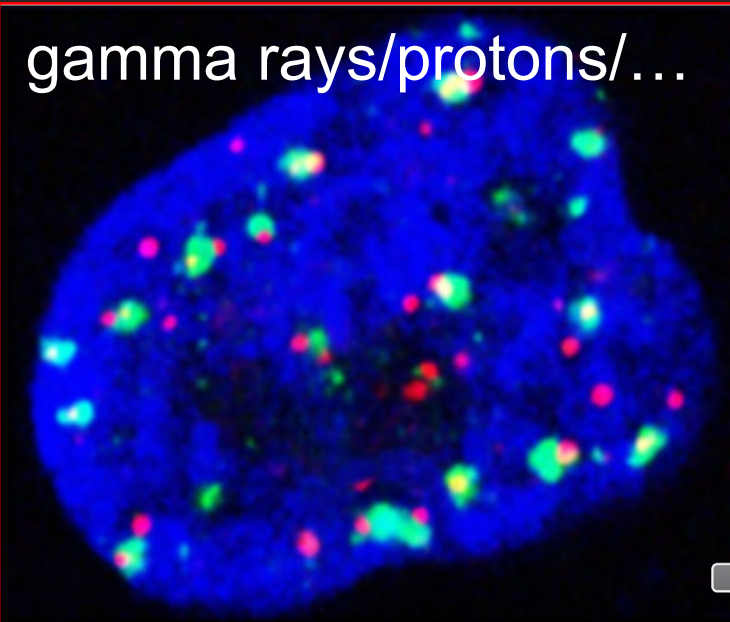
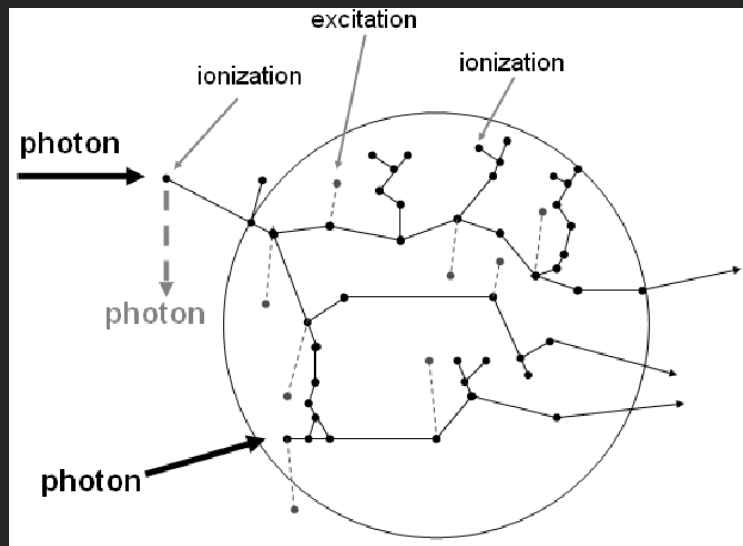
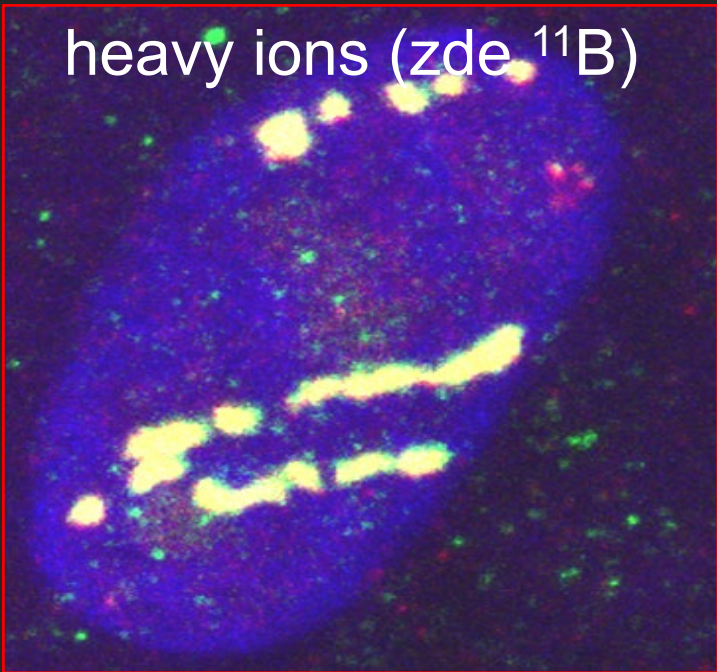
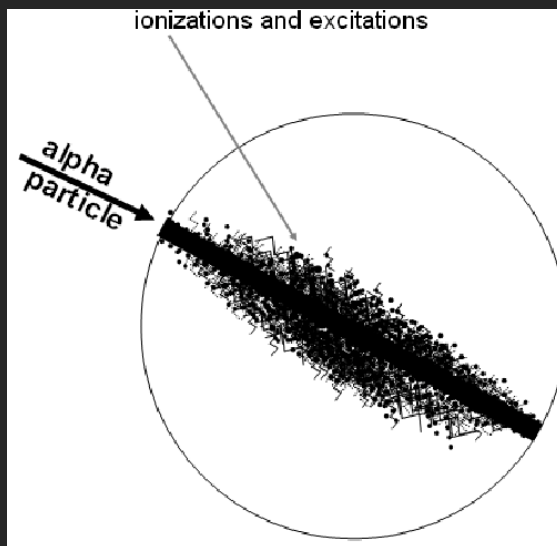
Nízký LPE: [elektrony](#), [záření γ](#) a [rentgenové záření](#).

Záření s vysokým LPE = **hustě ionizující záření**,

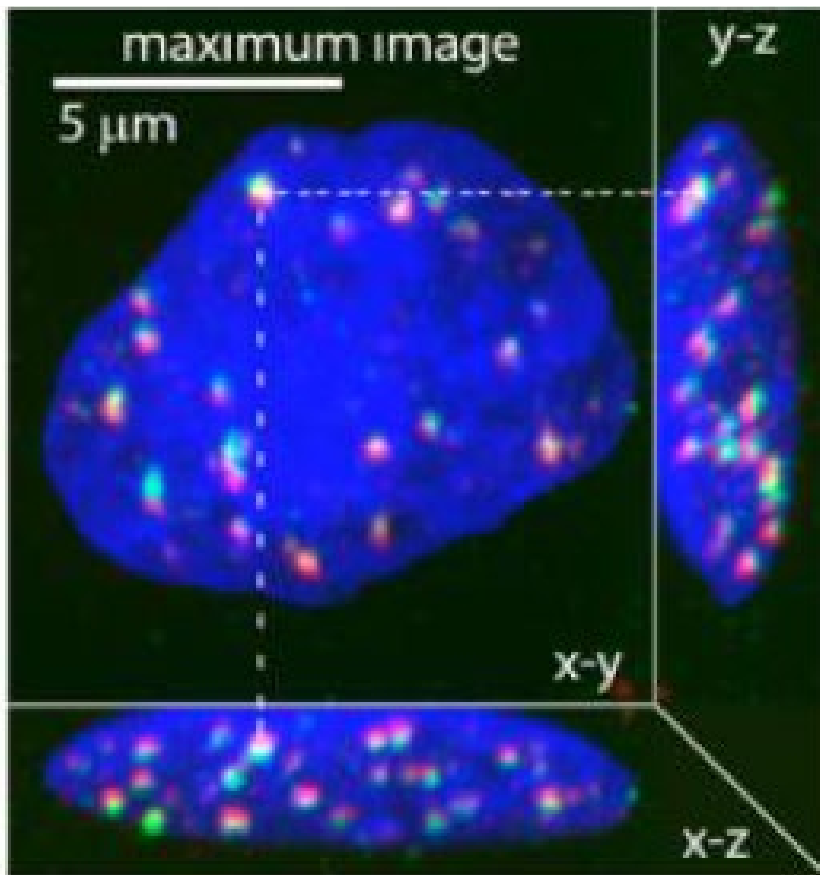
Záření s nízkým LPE = **řídce ionizující záření**.



Poškození při stejné dávce (1 Gy)



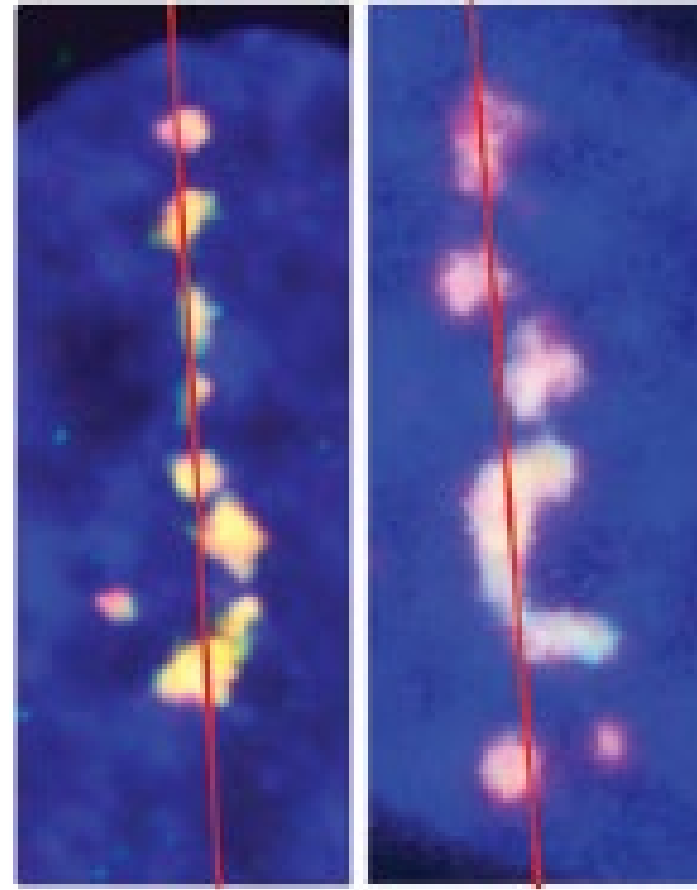
IONIZACE – LINEÁRNÍ PŘENOS ENERGIE (LPE / LET)



Low-LET (γ -rays)

^{11}B

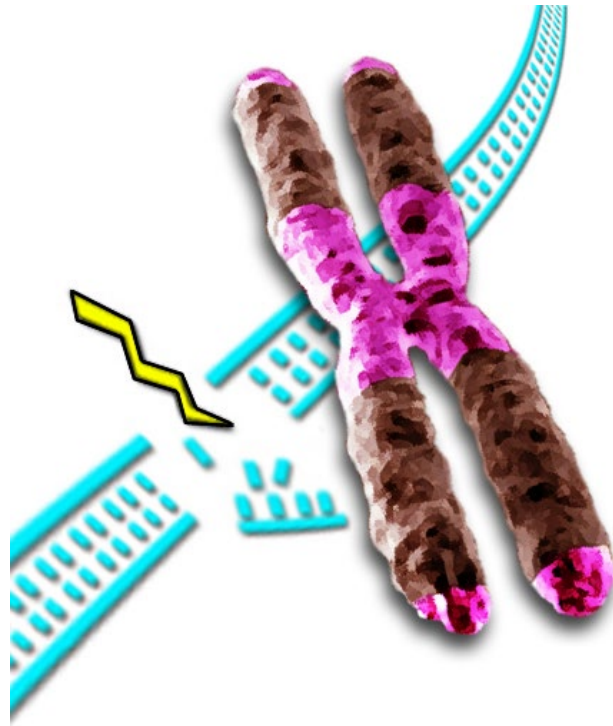
^{20}Ne



High-LET ^{11}B and ^{20}Ne ions

IONIZACE – LINEÁRNÍ PŘENOS ENERGIE (LPE / LET)

Jednoduché vs. mnohočetné DSB (DSB klastry)
DSB = dvouřetězcové zlomy DNA



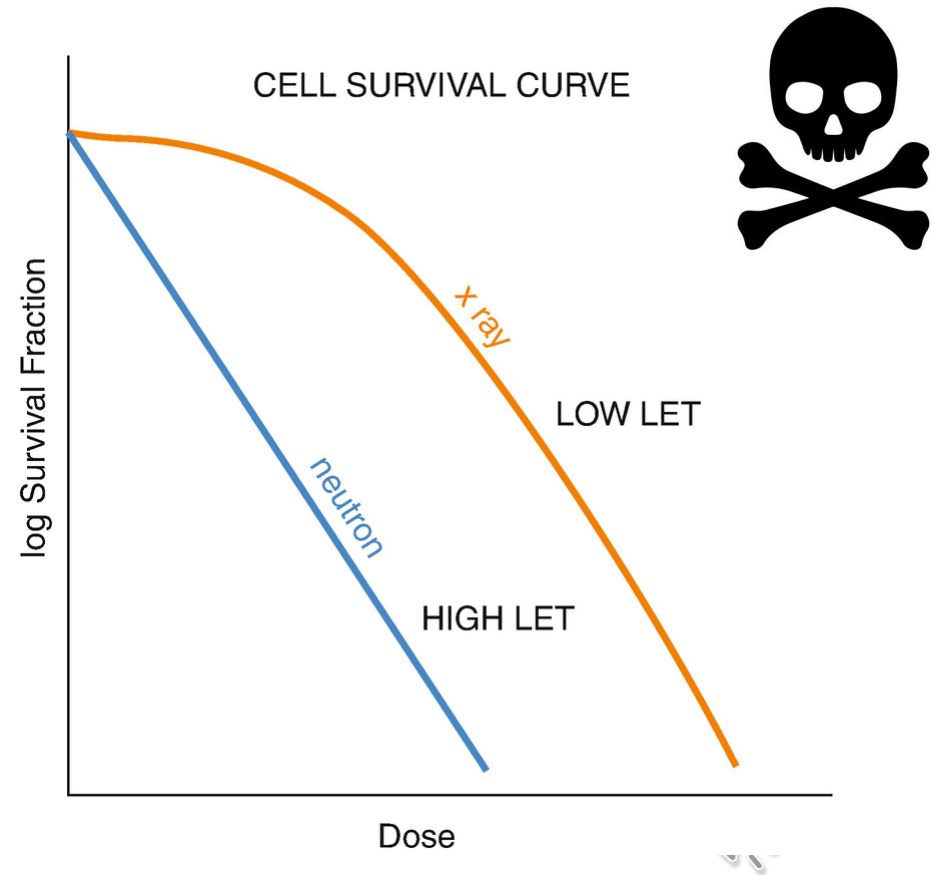
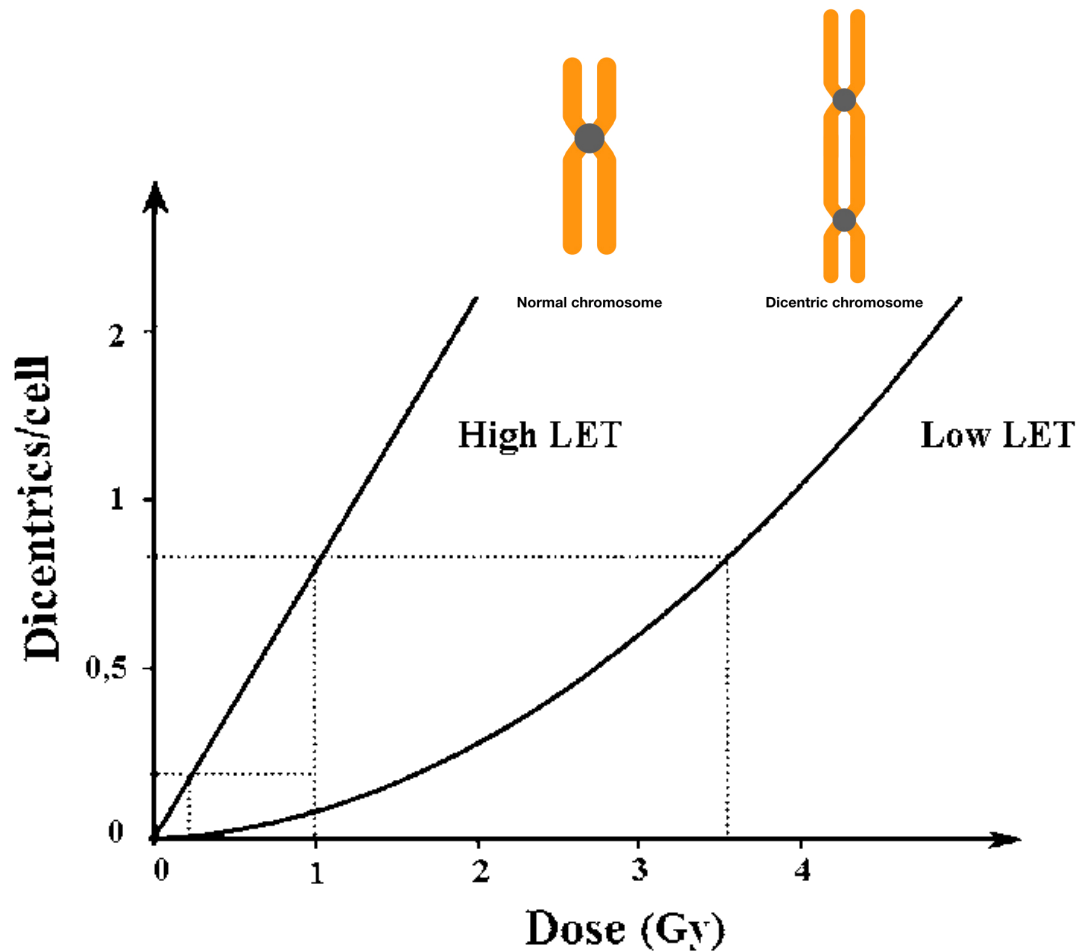
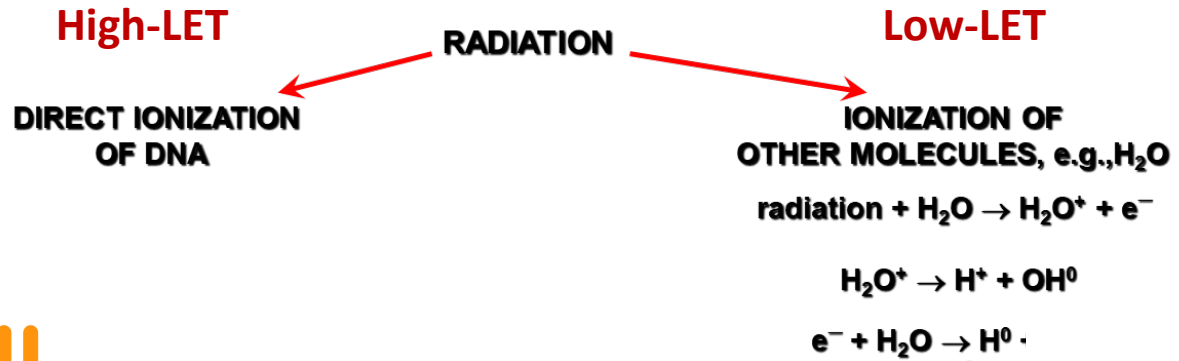
≈



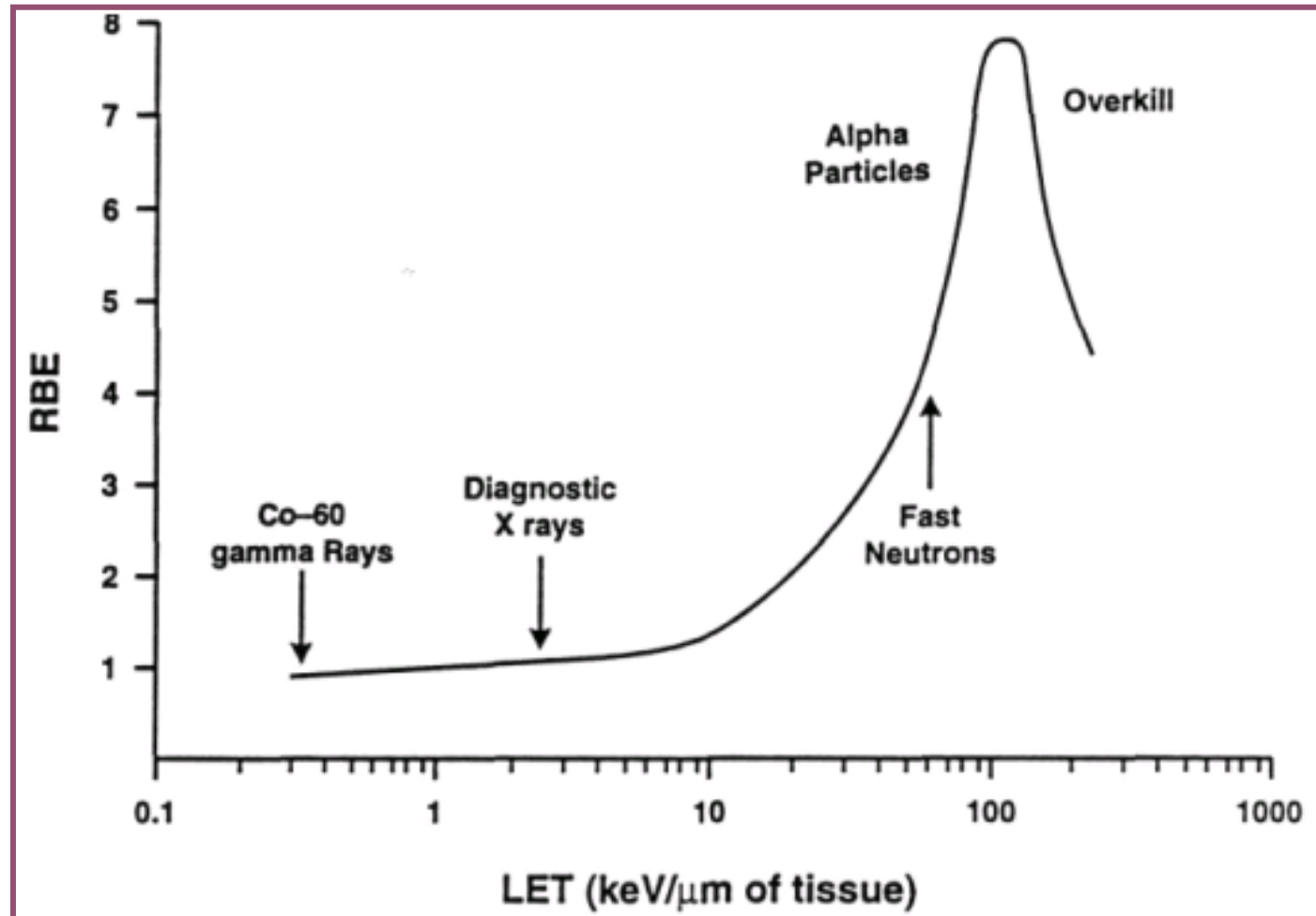
- Kumulace špatně opravených DSB = KARCINOGENEZE
- Radioterapie (a některé formy chemoterapie): **těž založena na indukci DSB**



Dose-Response Curves vs. LET

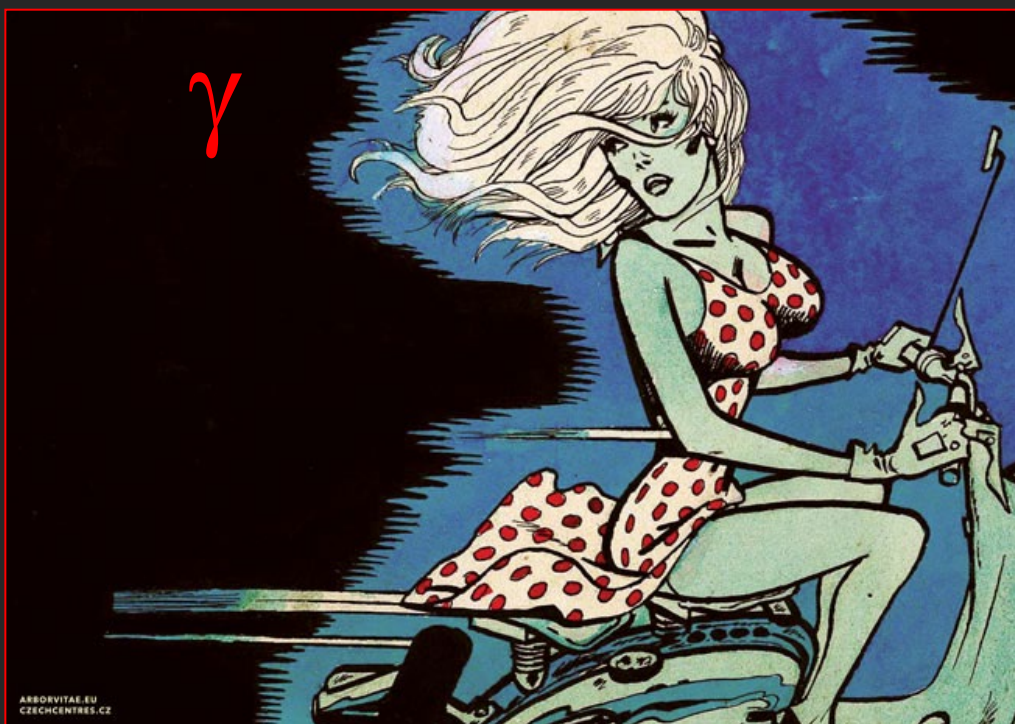


For low LET radiation, $\Rightarrow \text{RBE} \propto \text{LET}$, for higher LET the RBE increases to a maximum, the subsequent drop is caused by the overkill effect.



HLOUBKOVÁ DEPOZICE DÁVKY

1. ENERGIE / RYCHLOST částice



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



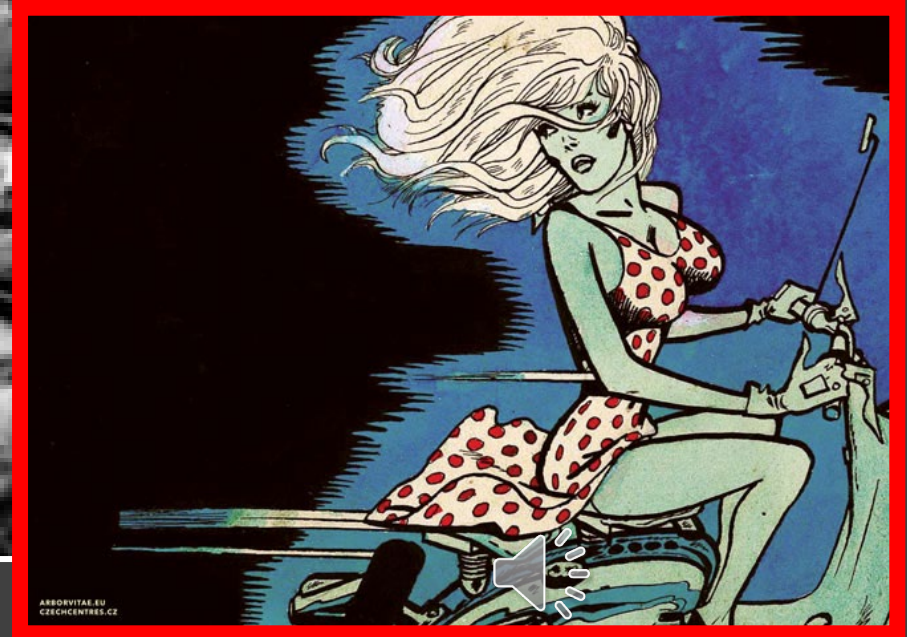
těžký iont: hmotnost velká, rychlost malá, dolet malý, počet ionizací/ztráty energie na jednotku dráhy – obrovský (proměnlivý)



2. HMOTNOST / VELIKOST



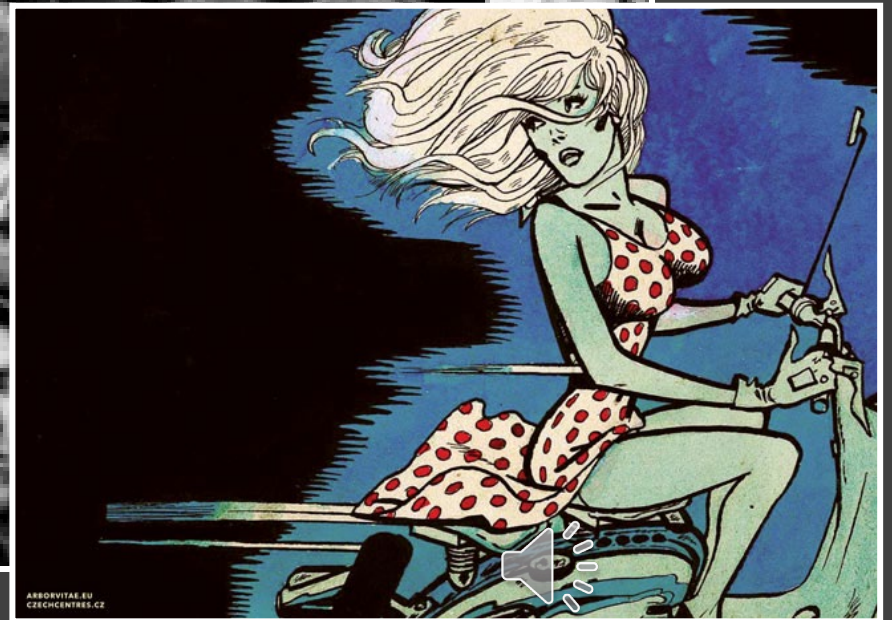
Falk M



ABBORVITAE.EU
CZECHCENTRES.CZ

VLASTNOSTI ZÁŘENÍ VE VZTAHU K INDUKCI DSB

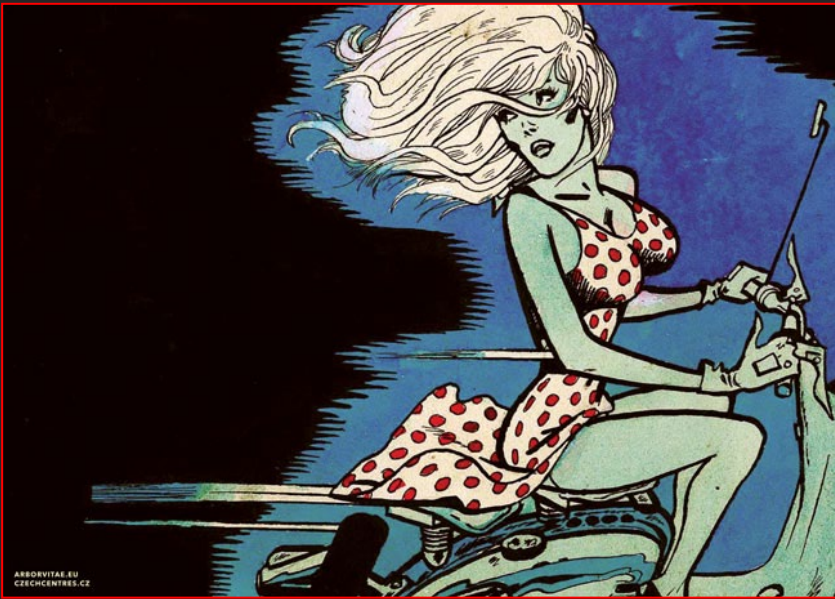
3. NÁBOJ



ROZDÍLNÉ VLASTNOSTI ZÁŘENÍ VZTAHU K LET:

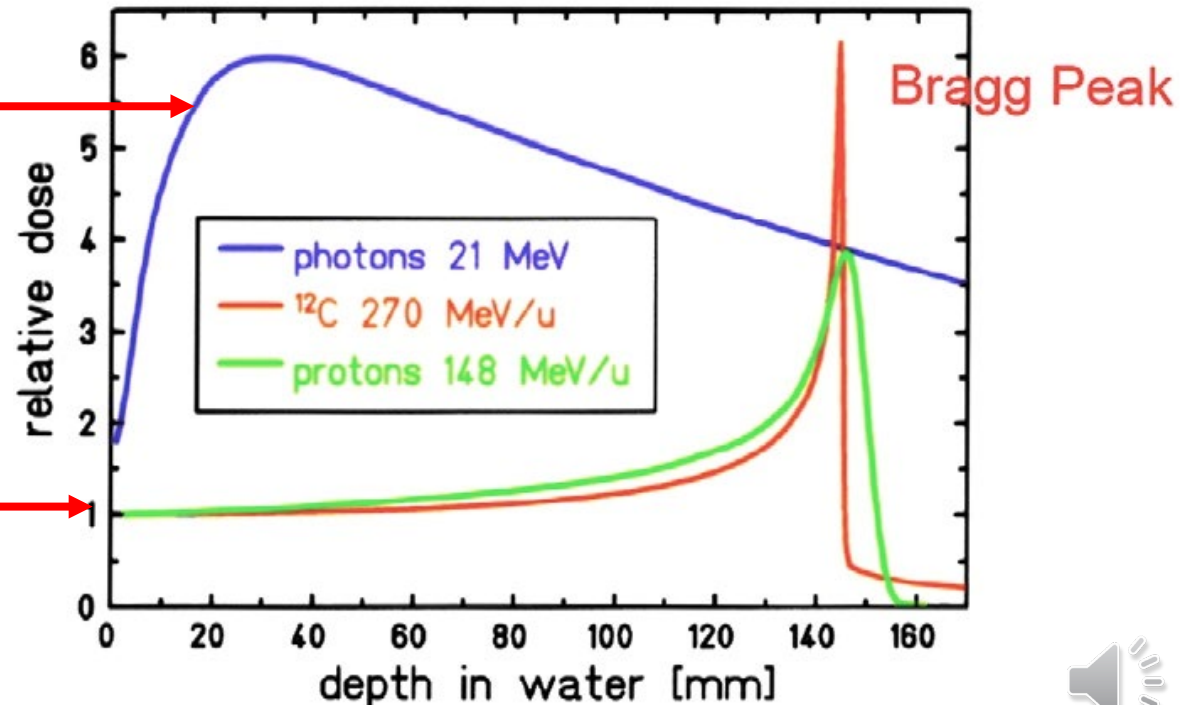
3. NÁBOJ

VS



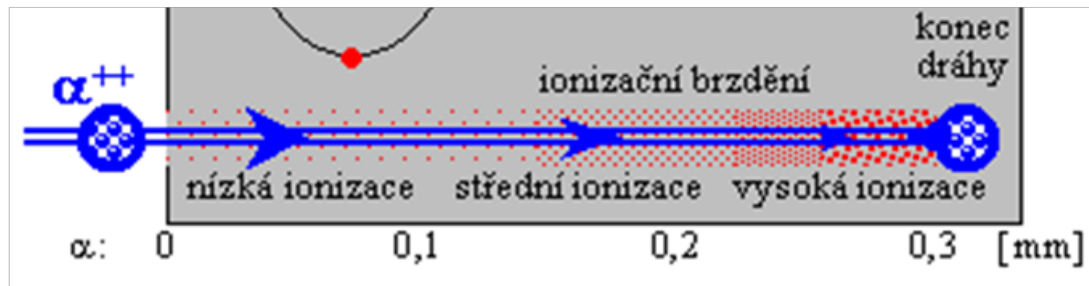
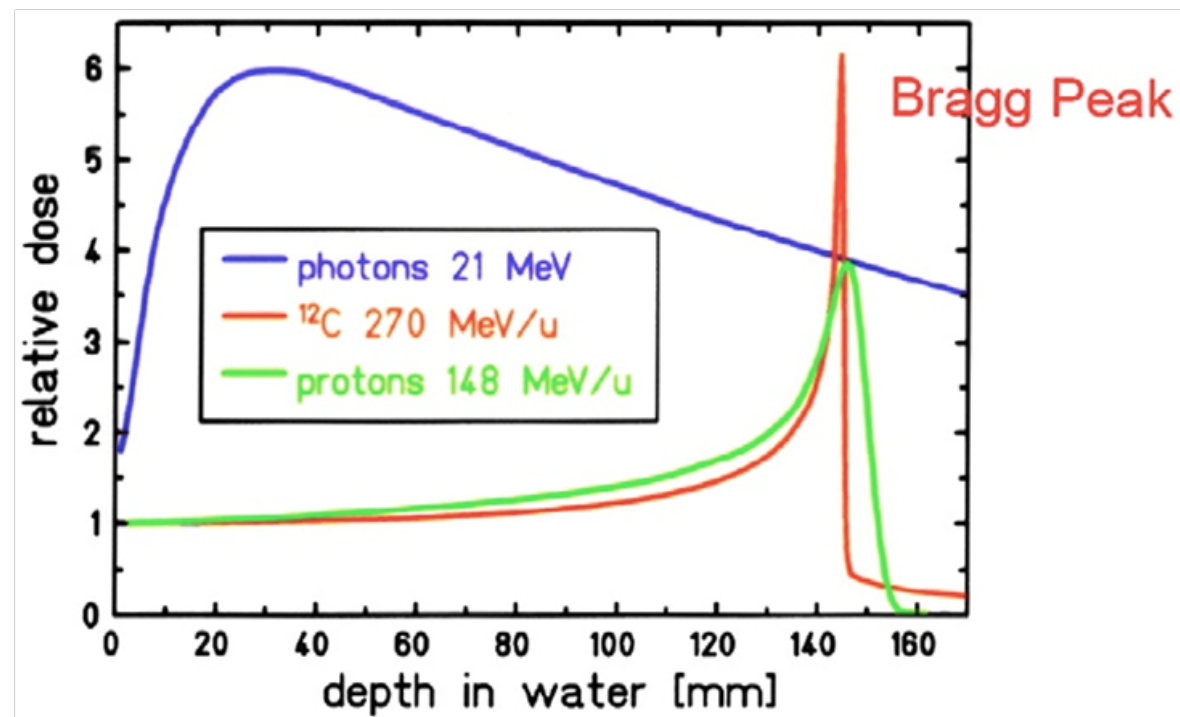
BRAGGOVY KŘIVKY

- **Braggovy křivky** popisují závislost LET (též mluvíme o specifické či lineární ionizaci) na hloubce průniku nabité 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;

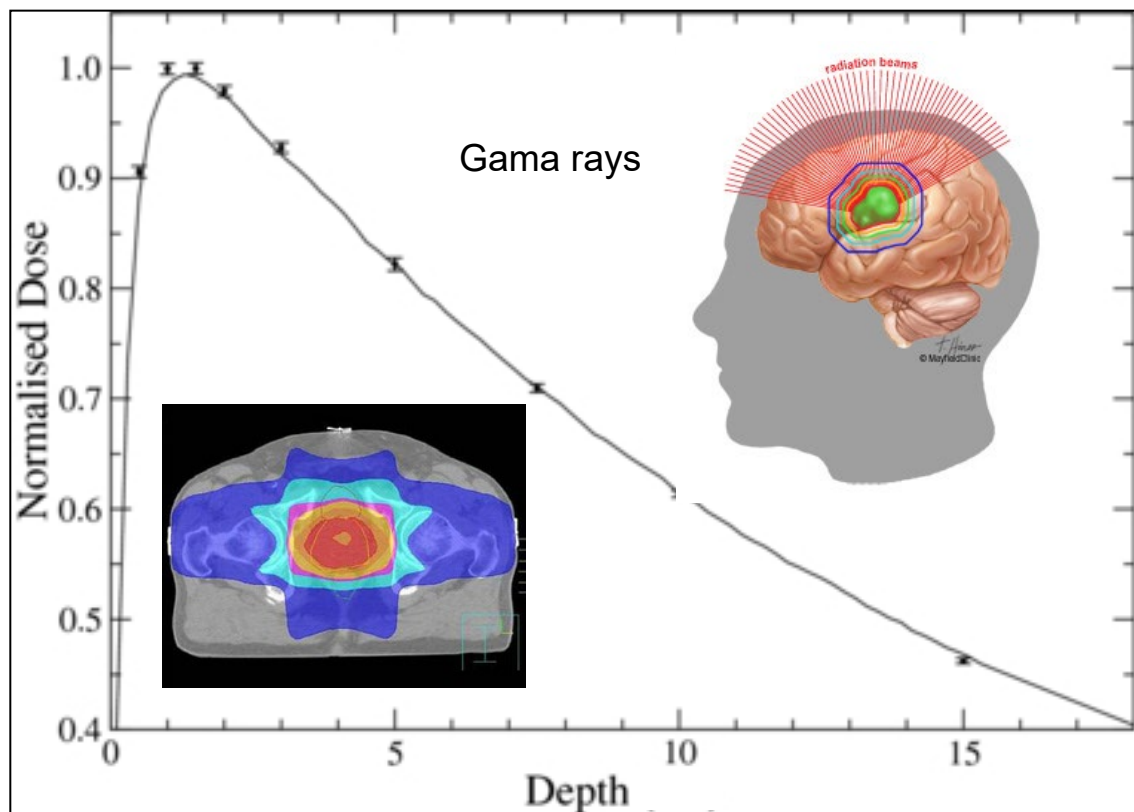


BRAGGOVY KŘIVKY

- 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**).



Současná radioterapie: paprsky gama a X (RTG)



pokožka → zdravá tkáň → tumor
(životně důležitá)

Výhody metody

- levná
- technicky méně náročná
- „méně citlivá“ na pohyb orgánů (dýchání, srdeční tep)

Nevýhody

- dávka klesá se vzdáleností
- velké poškození zdravé tkáně
- nízký zabíjecí účinek na jednotku dávky (velké množství nádorů je radiorezistentních)

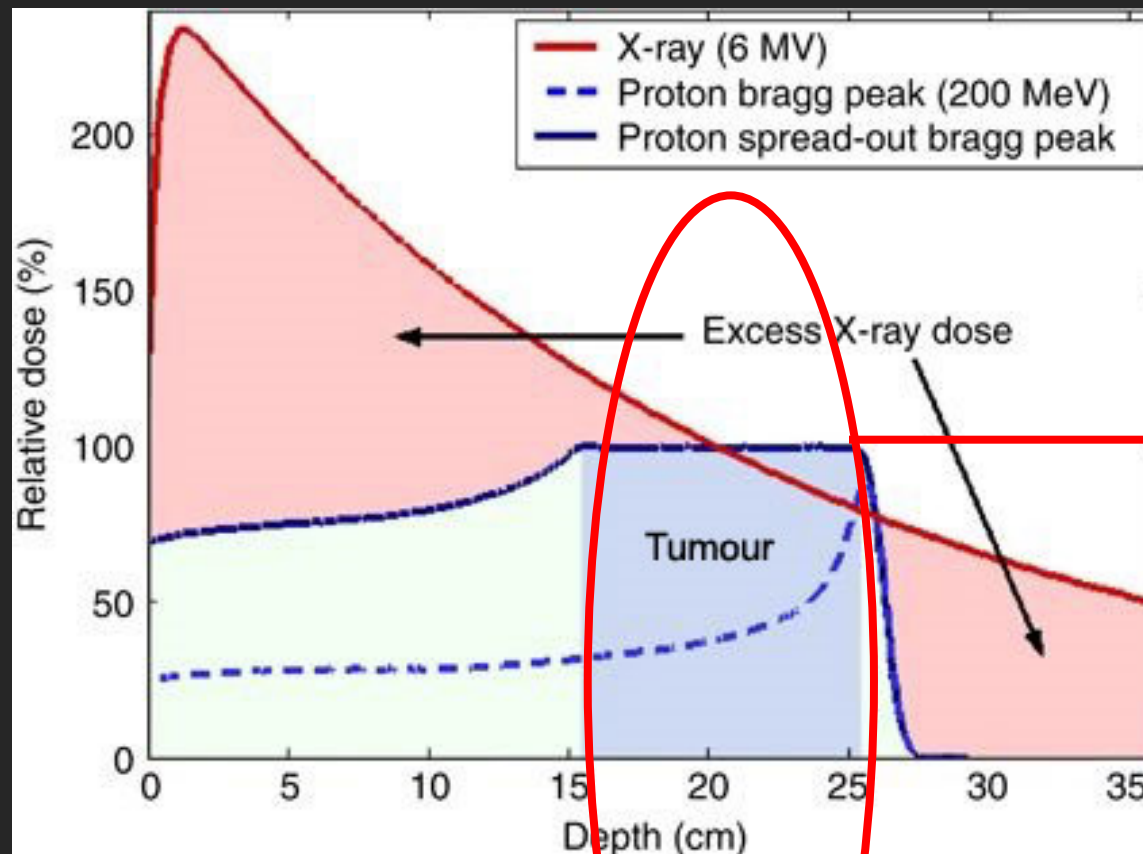


frakcionovaná terapie

- časově
- prostorově



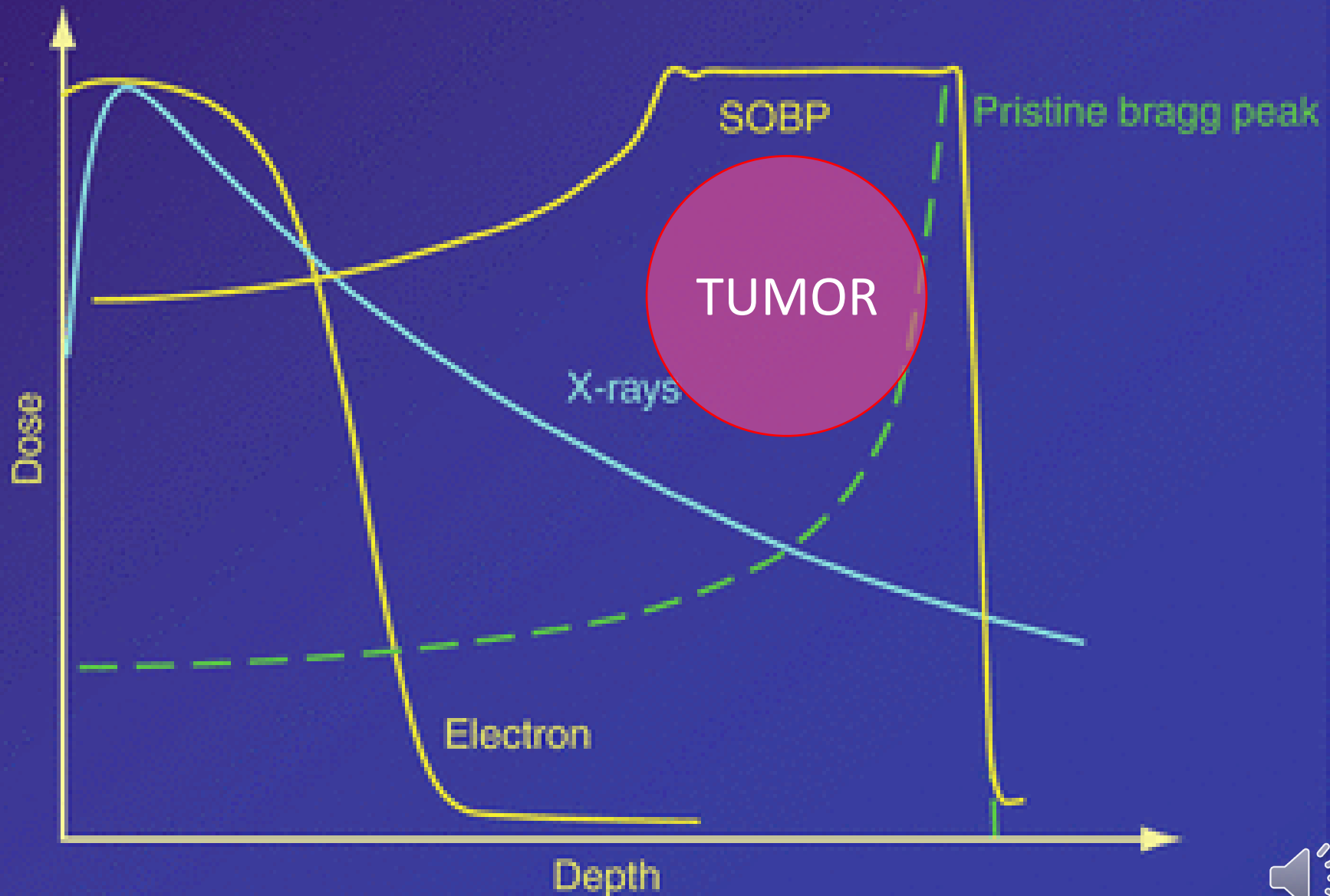
- Po zabrzdění je částice neutralizována záchytem elektronů a další ionizace již nepokračuje
- využití této výhodné hloubkové závislosti ionizace **v radioterapii**
→ tzv. **hadronová radioterapie**
- (viz samostatná přednáška).



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

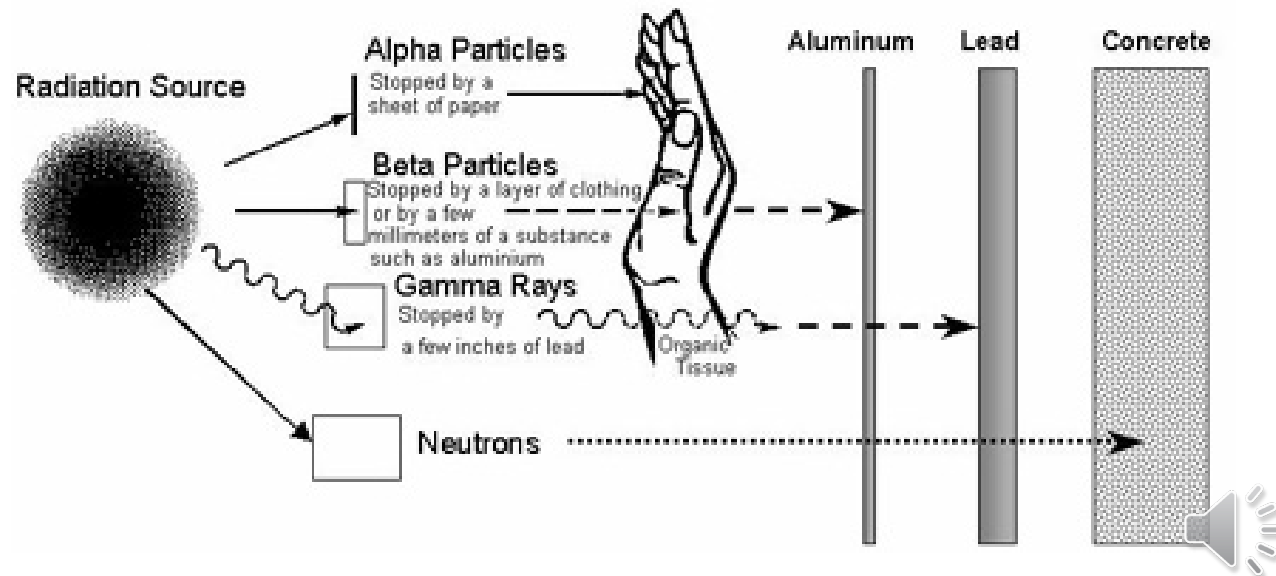
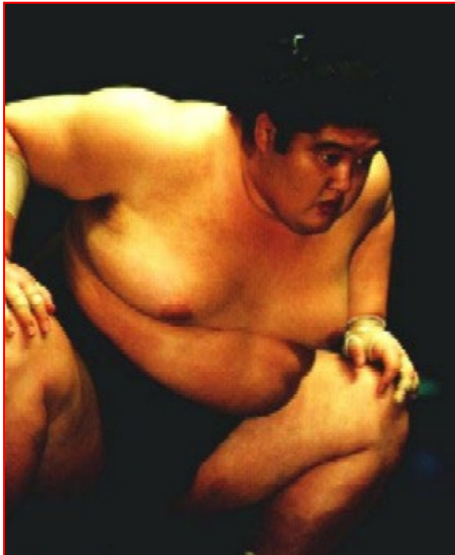


Percent depth dose for X-rays, electrons, and protons (pristine and SOBP)

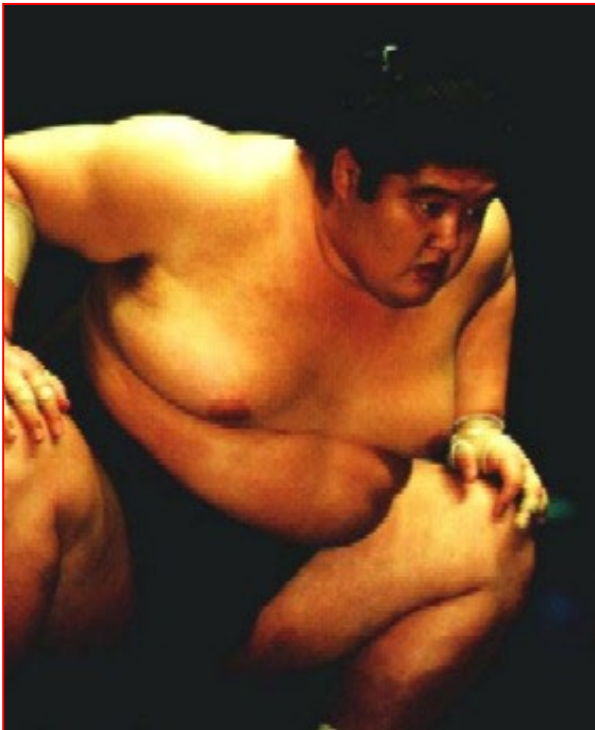


1A_1. Interakce těžkých nabitých částic - IONIZACE

- hlavním interakčním procesem je zde **IONIZACE**
- ionizuje především vlastní nabitá částice, v menší míře pak vyražené 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)



1A_2. Interakce těžkých nabitých částic – INTERAKCE S JÁDRY



- kromě ionizace se uplatňuje také

INTERAKCE NABITÝCH ČÁSTIC S ATOMOVÝMI JÁDRY

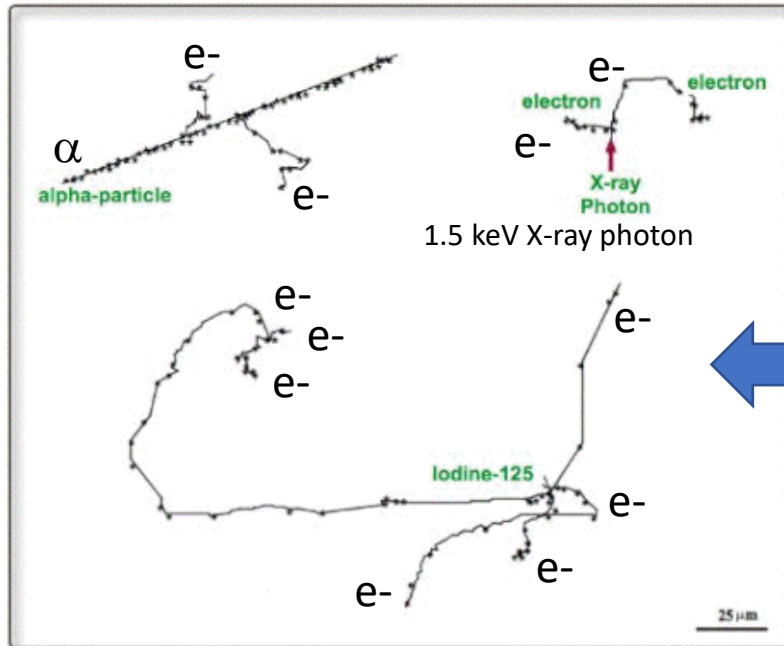
- ve srovnání s ionizací však při běžných reakcích tvoří jen zanedbatelnou složku,
- využívá se jich v některých zdrojích neutronů [např. ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$]
- Při průchodu těžkých nabitých částic (těžké ionty, alfa částice) látkou zpravidla nemusíme uvažovat o ztrátě jejich energie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



1B_1. Interakce lehkých nabitých částic (e-, pozitrony)

1B_1. IONIZACE

- nejvýznamnějším interakčním procesem je **opět IONIZACE**
- **dráha letu** částice (průnik do hmoty) je **delší** než u těžkých částic,



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.

- Obecně má **záření β** ve vzduchu dolet decimetry až metry.

- **Dolet** však **značně závisí na energii**

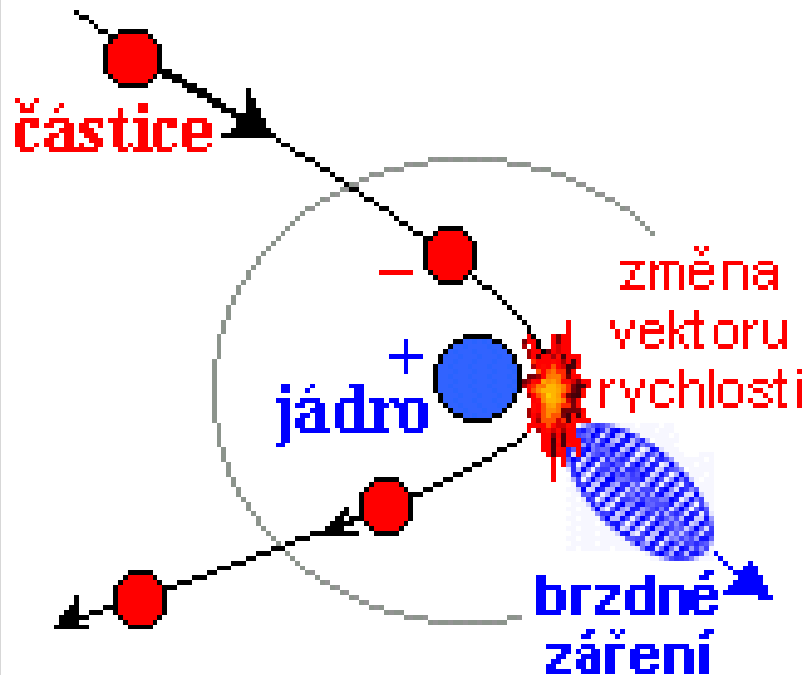
– pro vodu platí přibližně následující vztah:

$$R [\text{cm}] = E [\text{MeV}] / 2$$

- **dráha je ale zakřivená**, takže **hustota ionizace je menší**



Brzdné záření



1B_2. Interakce lehkých nabitých částic: BRZDNÉ ZÁŘENÍ

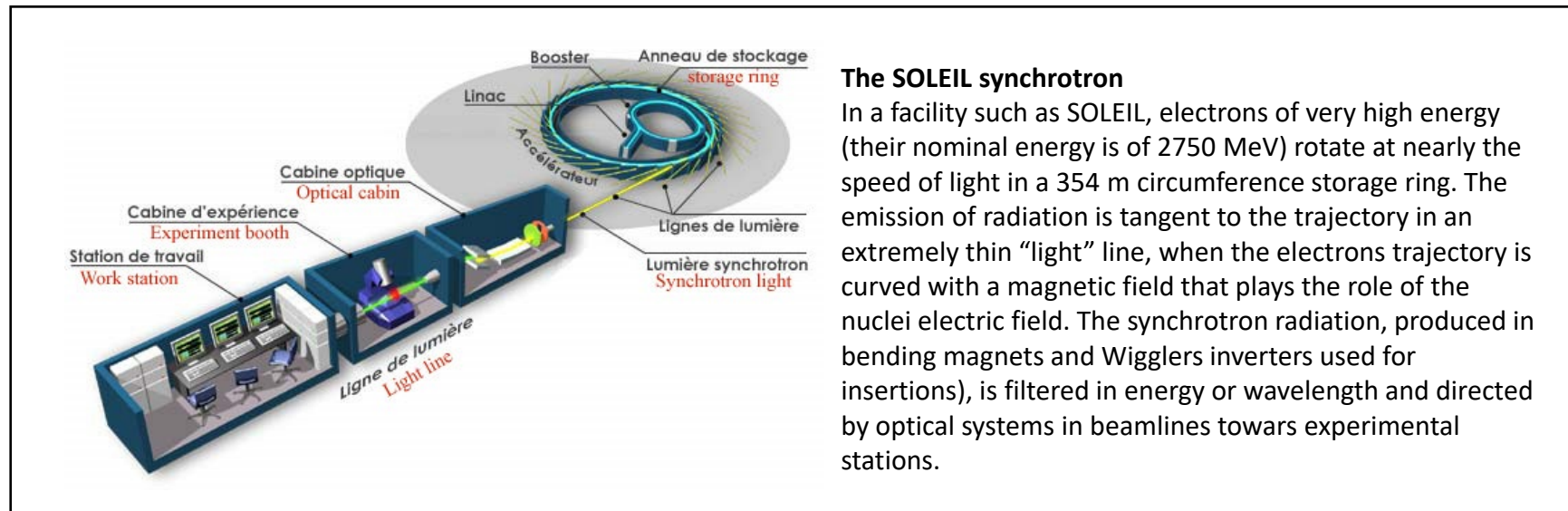
- BZ vzniká při zbrždování beta částic v materiálu

(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**

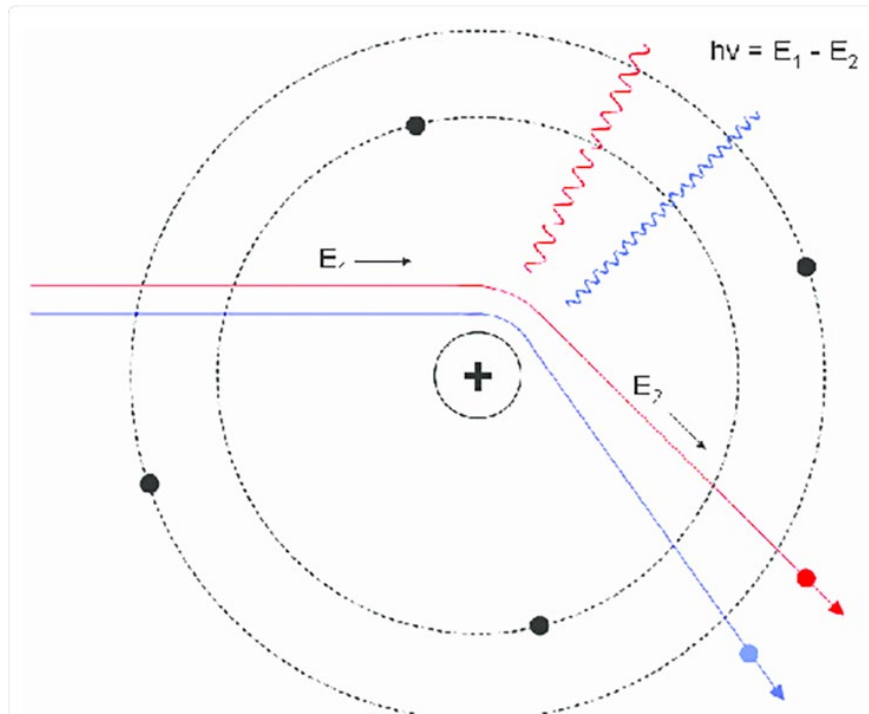


- Obecně vzniká BZ, když se rychle letící nabitě částice dostanou do silného elektromagnetického pole, kde jeho vlivem dojde k velké změně rychlosti (deceleraci) a směru letu dané částice.
- Za přírodních podmínek: průlet částice v poli orbitálních elektronů nebo atomových jader
- UMĚLE: v urychlovačích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

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



Energie emitovaných fotonů závisí na:

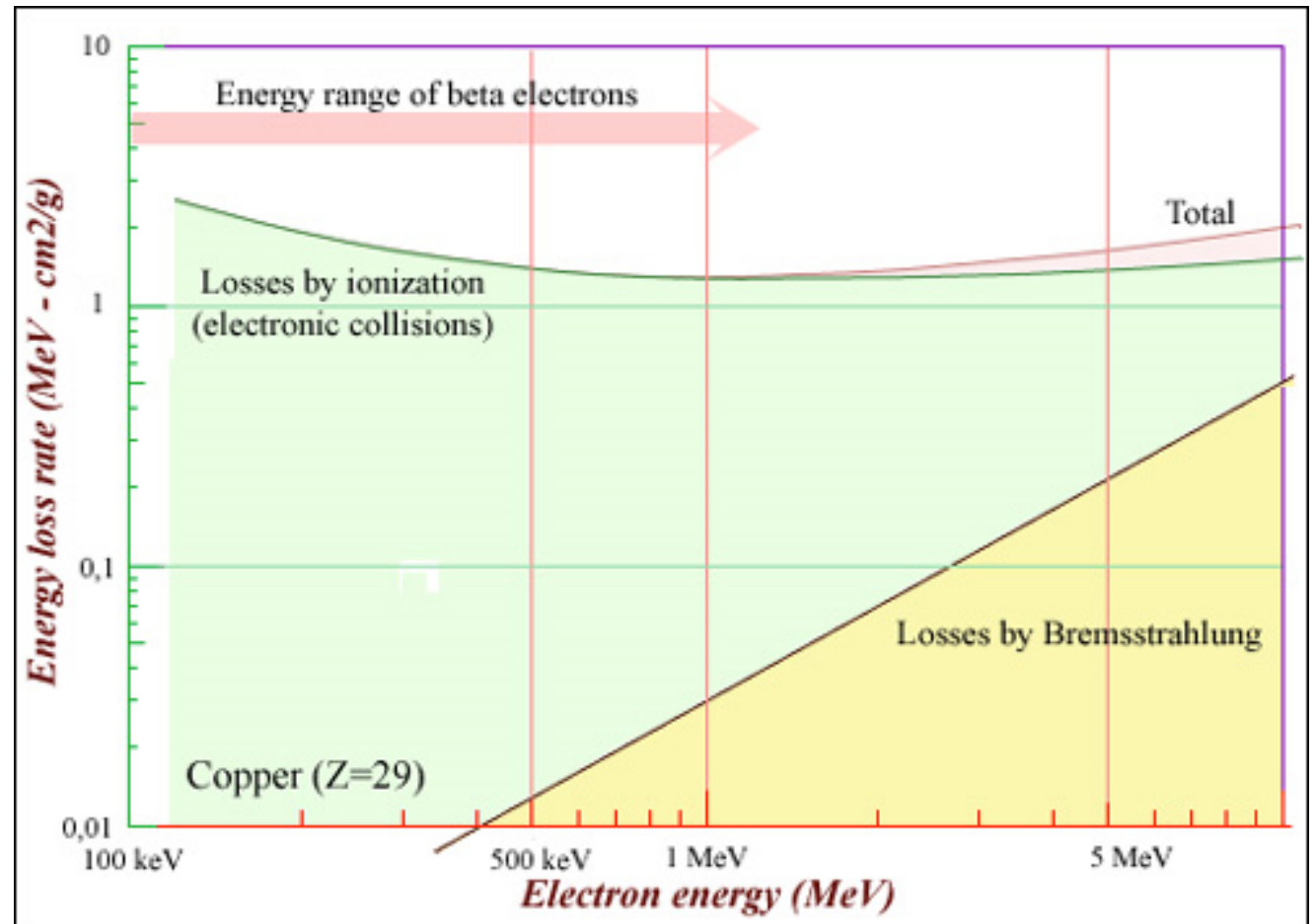
- **Vzdálenosti průletu** částice od jádra (nebo jiné částice)
- **Energii částice** ($\uparrow E$ (rychlost) $e^- \rightarrow \uparrow E$ fotonů BZ, tzn. tím tvrdší záření vzniká).

Tyto faktory se následně projeví velikostí změny vektoru rychlosti

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



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



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 není BZ příliš významné

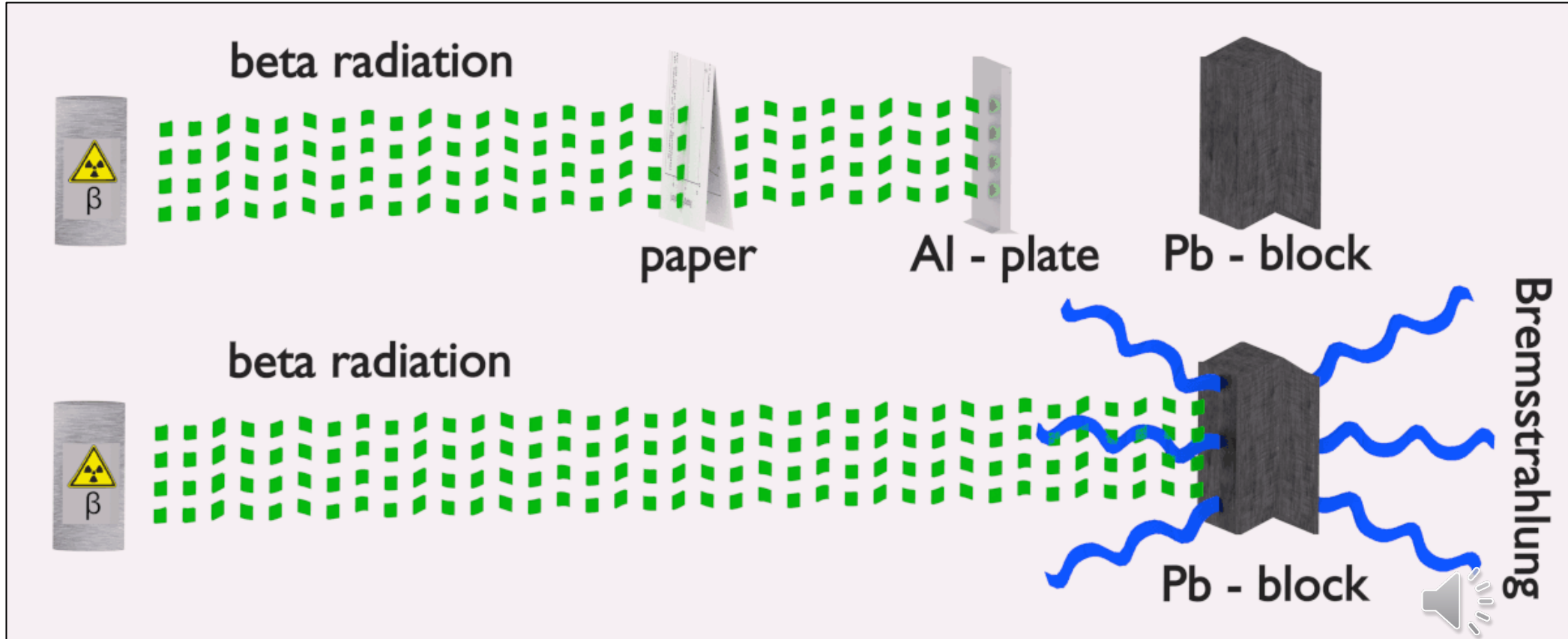
3. Hmotnosti částice

p+ a α částice produkují $< 1/10^6$ 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 (např. Pb). 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)

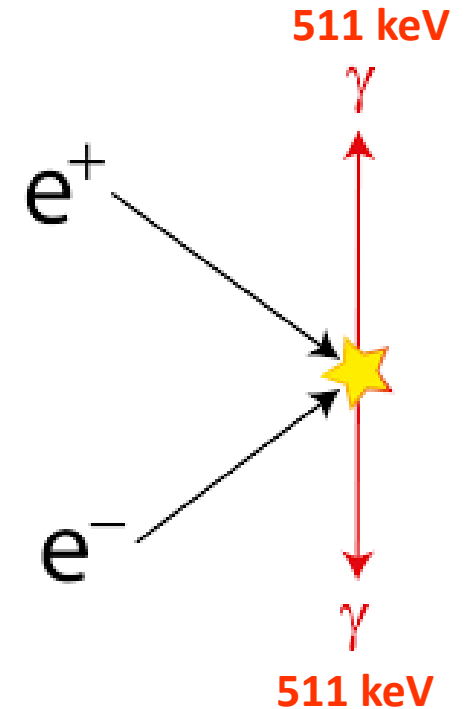


1B_3. Interakce lehkých nabitých částic: ANIHILACE β^+

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

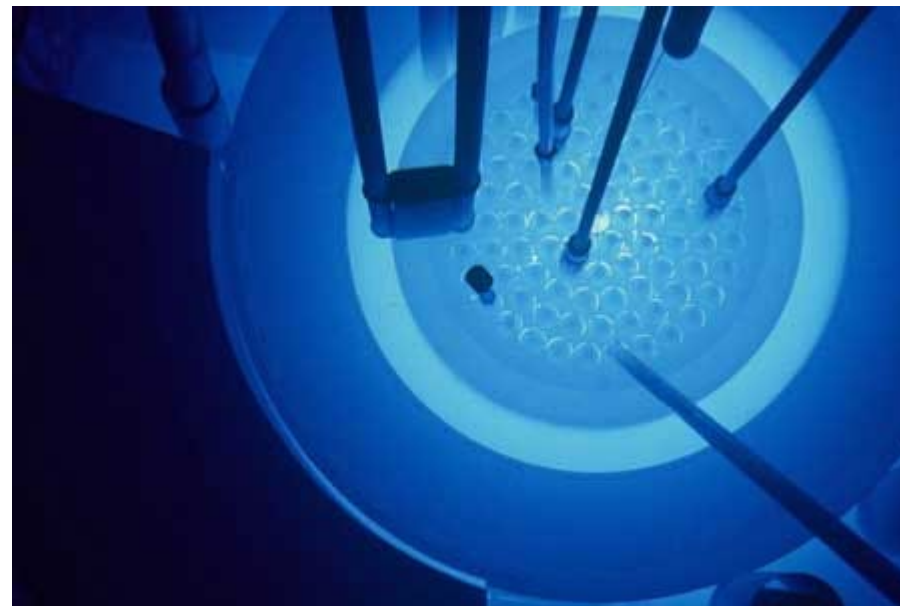


- energie gama fotonů je rovna hmotnosti anihilovaných částic (kinet. energie e^+ je totiž na konci dráhy téměř nulová).
- Dle $E=mc^2$ to představuje energii **511 keV** na každý foton



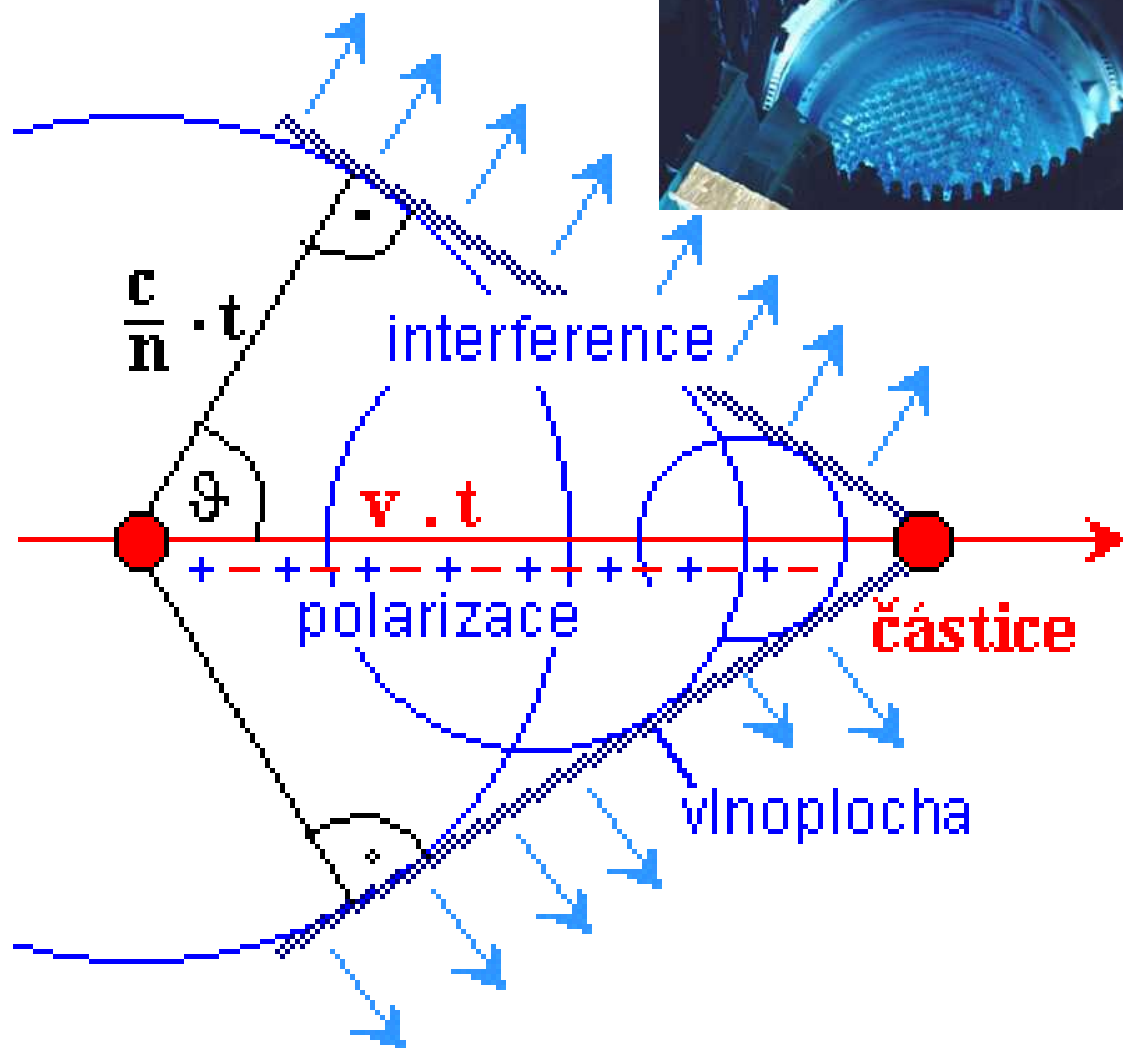
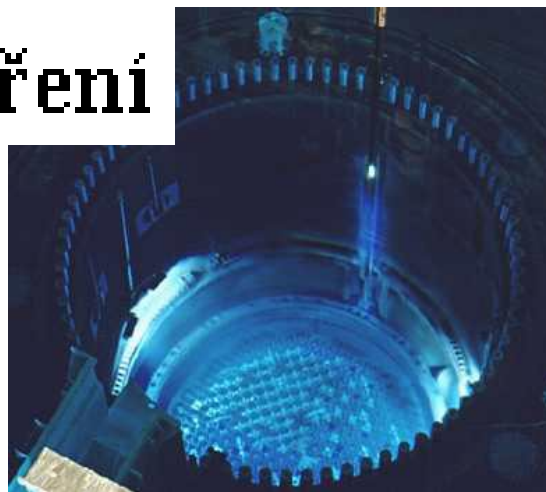
1B_4. Interakce lehkých nabitých částic: VZNIK ČERENKOVOVA ZÁŘENÍ

- vzniká u energičtěších 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**



Pohled do vídeňského reaktoru TRIGA Mark-II vyplněného Čerenkovovým zářením. (Zdroj: Euronuclear.org)

Čerenkovovo záření



FASTER THAN LIGHT

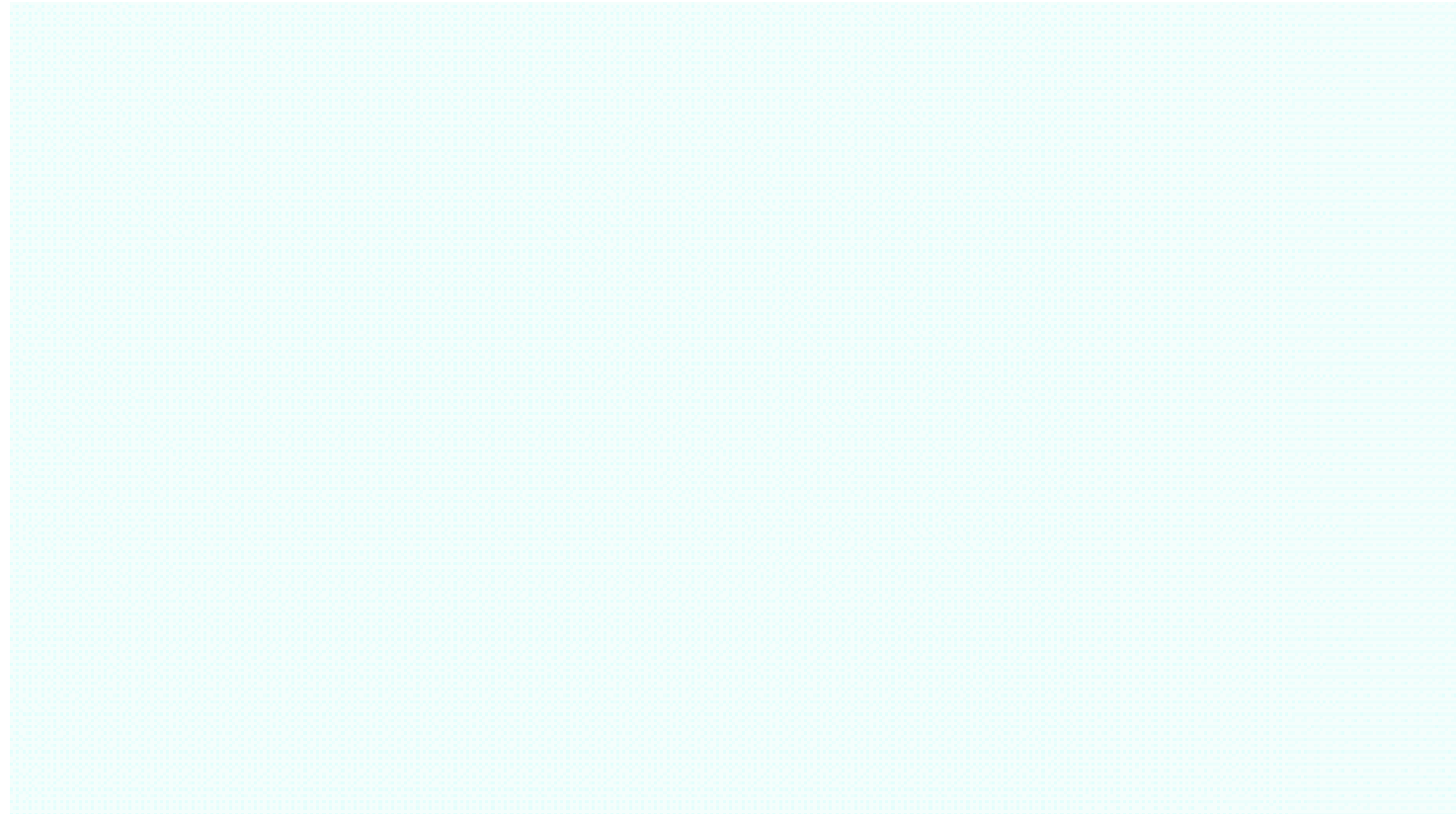
Pokud e^- letí v daném materiálu rychleji než světlo (v materiálu je totiž světlo pomalejší než ve vakuu), vznikají **vlnoplochy světelné energie**, které mohou interferovat a zesilovat se –

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



ČERENKOVOVO ZÁŘENÍ

n = index
lomu daného
optického
prostředí pro
danou
frekvenci
záření



2: Interakce nepřímo ionizujícího záření

- **Nepřímo ionizující** záření je záření, které nenese elektrický náboj – materiál tedy neionizuje přímo, nýbrž prostřednictvím produkce sekundárních (delta) elektronů
- Jedná se o:
 - 2A: **elektromagnetické záření (fotony):**
 - Paprsky gama
 - Rentgenovo záření
 - 2B: **částice bez elektrického náboje:**
 - neutrony



2A_1: INTERAKCE FOTONŮ: FOTOEFEKT

interakcí je celá řada, mezi nejdůležitější patří:

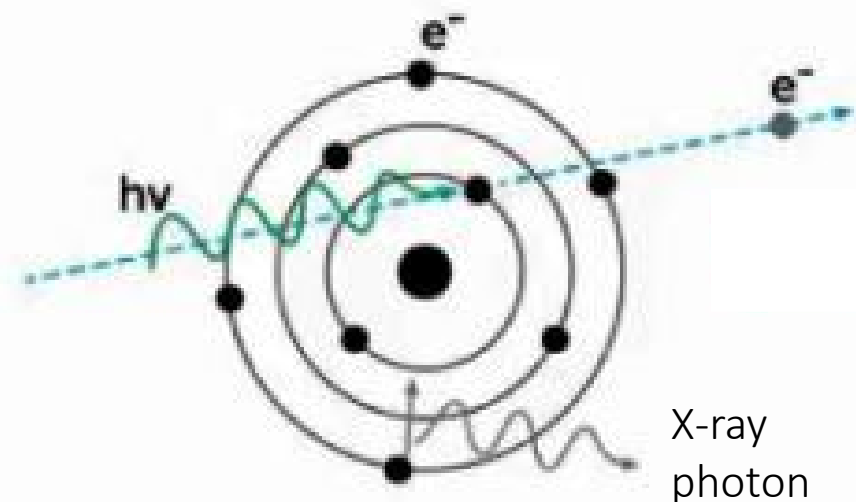
1. FOTOELEKTRICKÝ JEV – FOTOEFEKT

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^-)

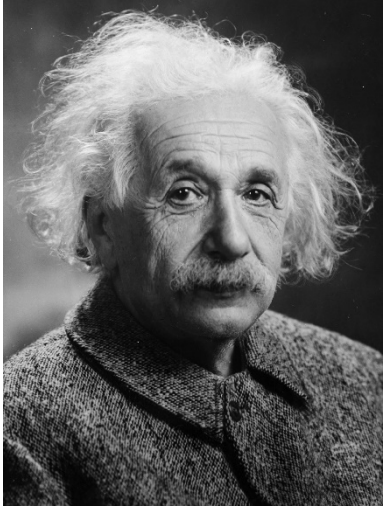
X-ray-matter interaction



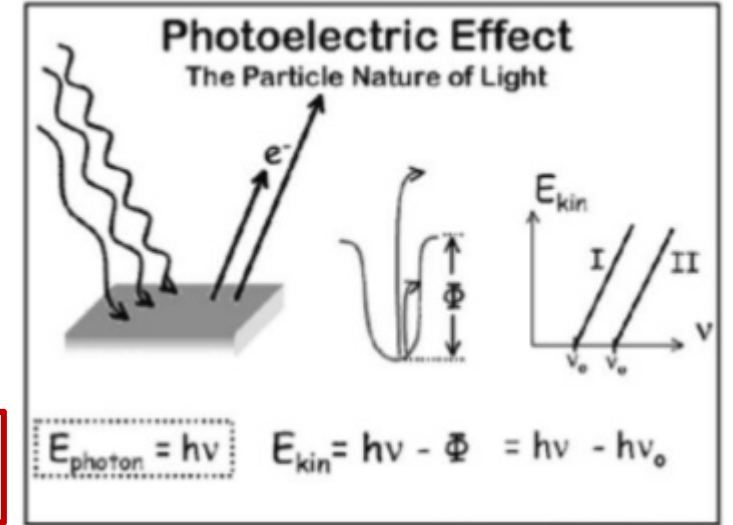
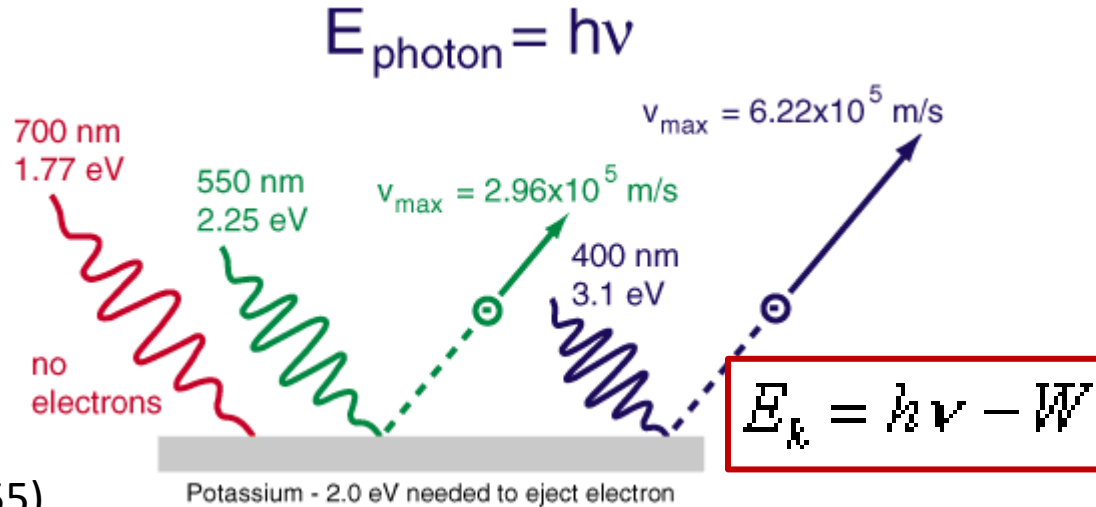
photoelectric effect



Photoelectric effect



Albert Einstein (1879 – 1955)



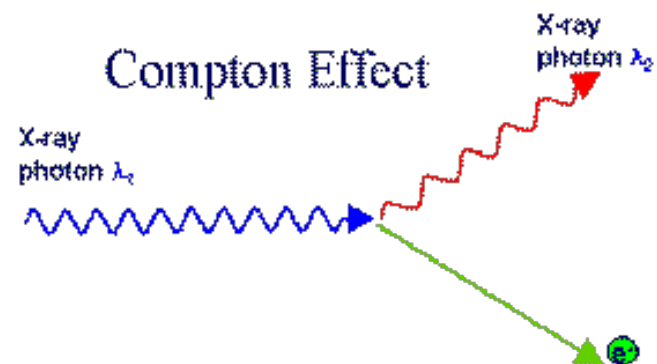
UC Berkeley's Digital Chem1A

- 1) Photon particles collide with the atom on metal surface.
- 2) These particles when collide with electrons transfer their energy to these electrons and , the electron is ejected from the metal surface. The ejected electron is known as Photoelectron.
- 3) No photoelectron will be emitted if the incident photon's energy is less than the work function
- 4) For the photons with insufficient energy ($<\Phi$), increasing the light intensity does not lead to photoelectron emission
- 5) For photons with sufficiently high energy ($>\Phi$), increasing the light intensity leads to higher photoelectron emission, but the photoelectron energy does not increase
- 6) Kinetic energy of photoelectrons increases only with decreasing frequency (increasing energy) of incident photons

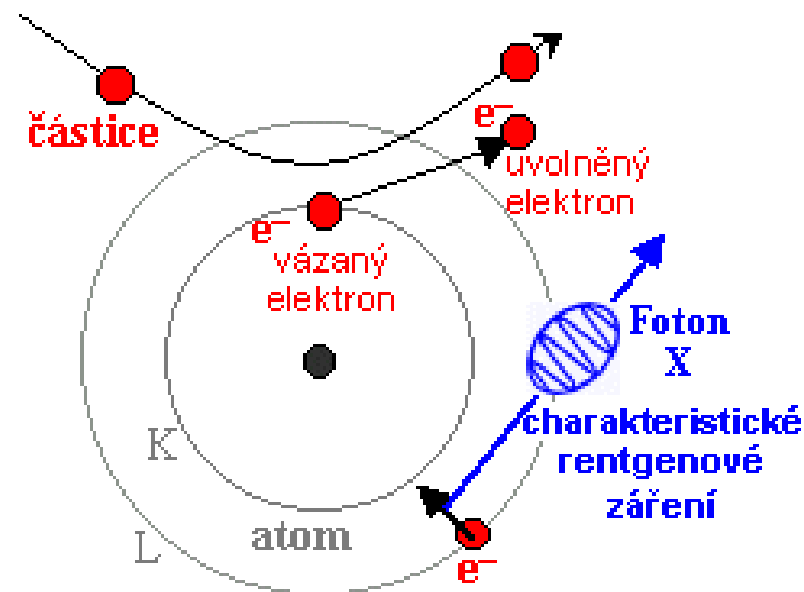
2A_2: INTERAKCE FOTONŮ

2A_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 $E = 200 \text{ keV} - 2 \text{ MeV}$**



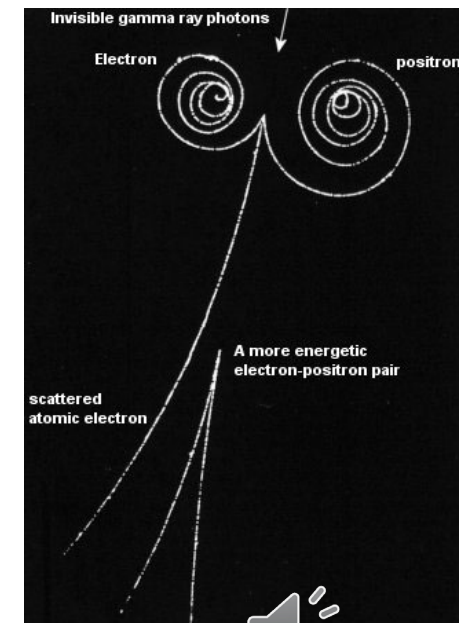
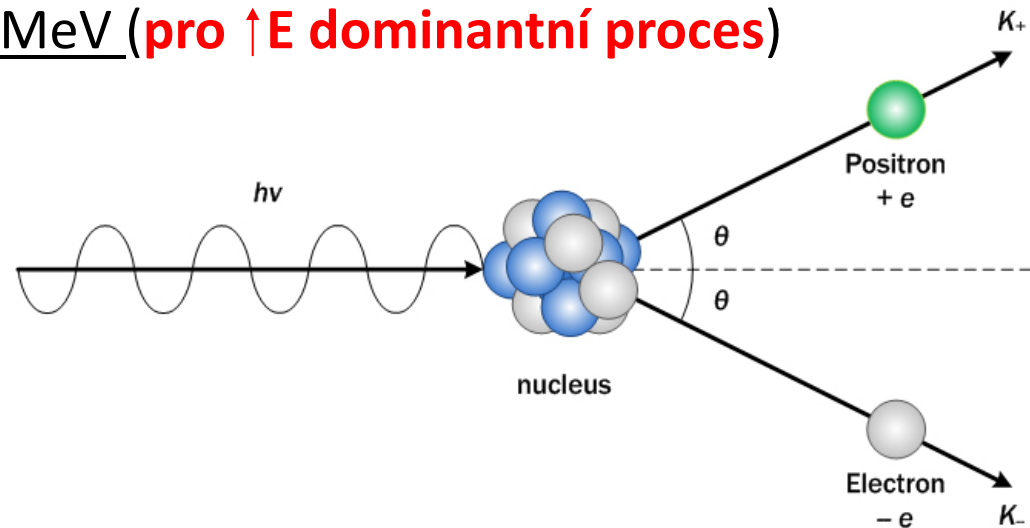
Fotoefekt a charakteristické X-záření

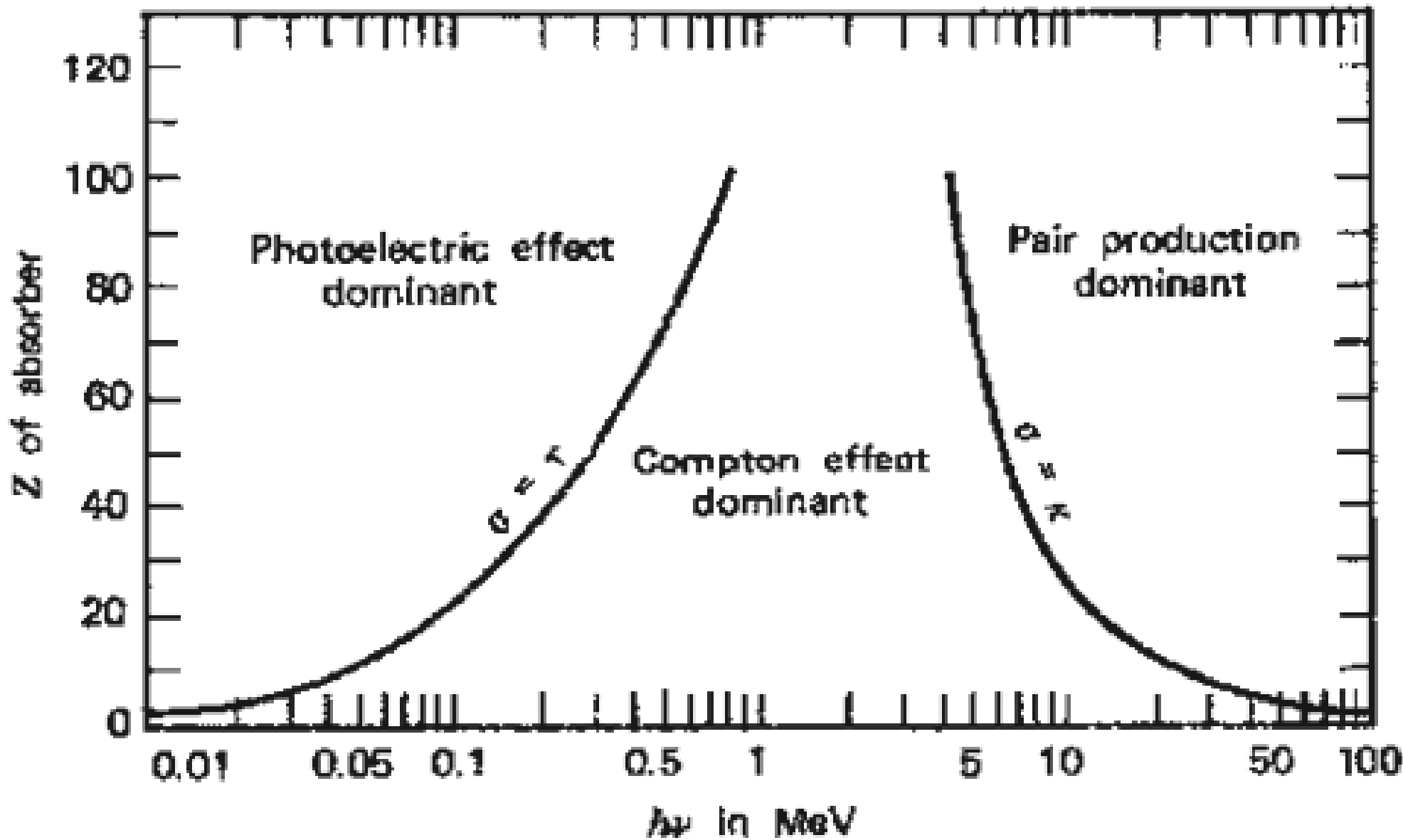


INTERAKCE FOTONŮ

2A_3. TVORBA ELEKTRON-POZITRONOVÉHO PÁRU

- Foton se v blízkosti jádra (nabité částice) zhmotní v elektron a pozitron (opačný proces k ANIHILACI pozitronu) → přeměna energie v hmotu
- Podmínkou je, že energie fotonu musí být větší než 1.02 MeV (2 x 0.511 MeV) (nejnižší možná energie e-),
- **Pozitron následně anihiluje** s e- v okolí
- typicky však >2 MeV (pro ↑E dominantní proces)



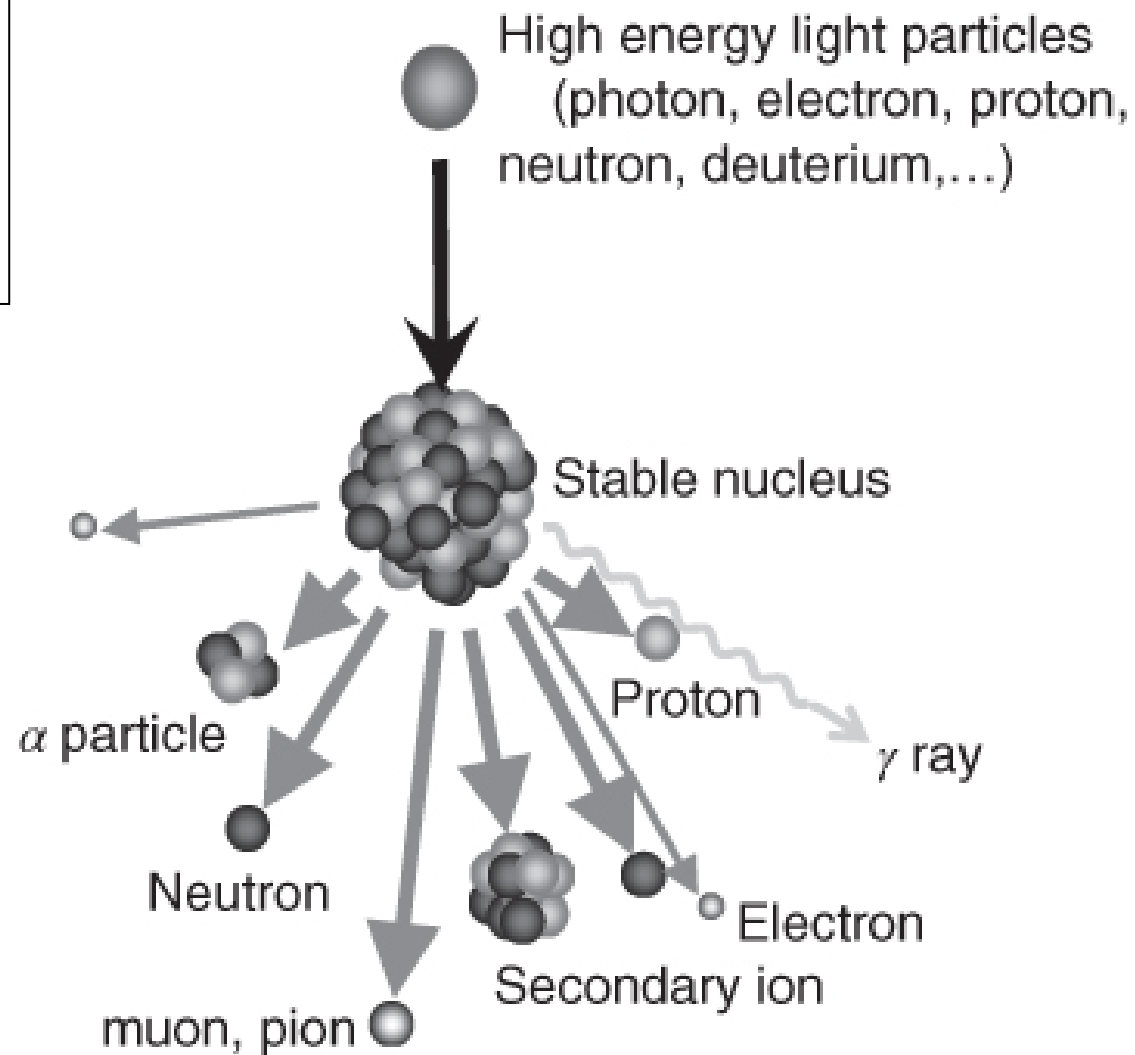


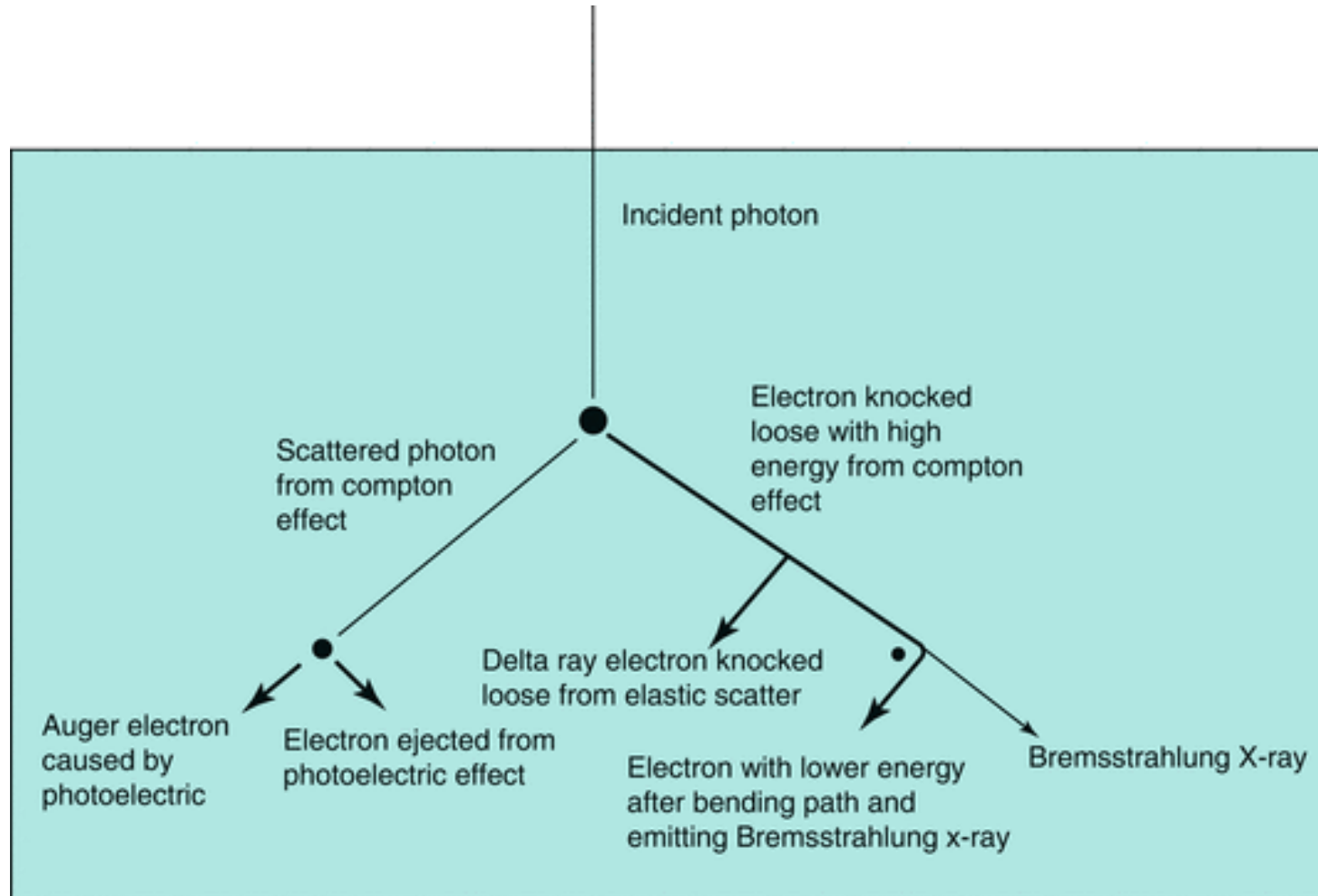
INTERAKCE FOTONŮ

2A_4: FOTOJADERNÉ REAKCE

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

+ další méně významné interakce

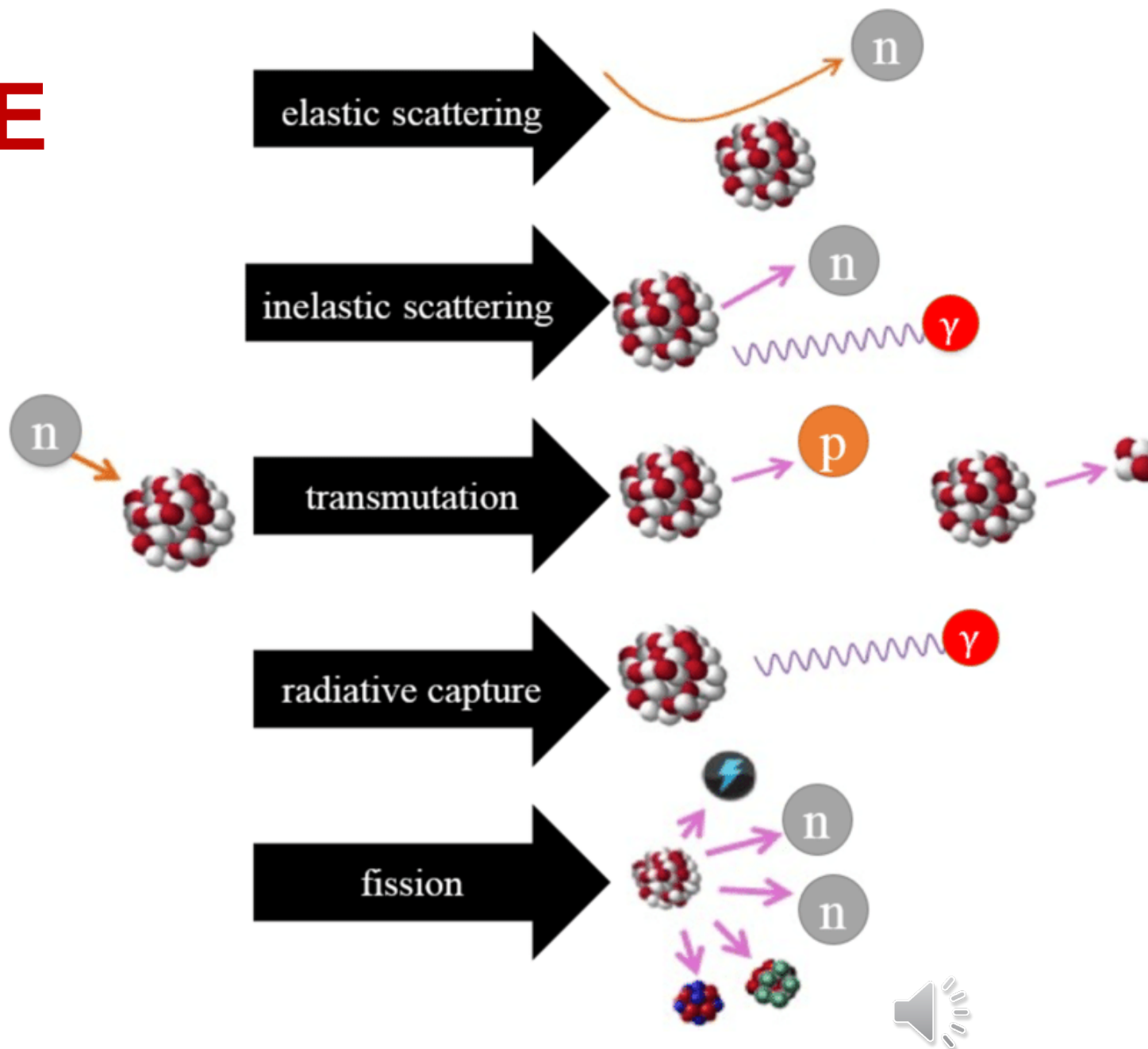




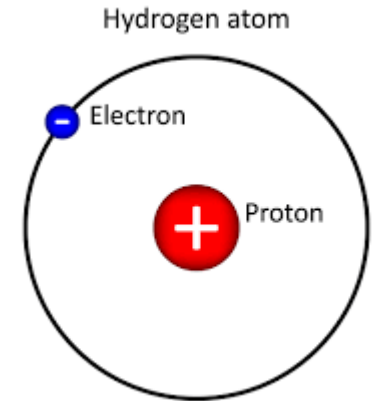
History of an incident photon: In this figure, the path length of photons are thin lines while the path of electrons are heavy lines. In this example, four different electrons and a Bremsstrahlung x-ray are set into motion by a single initial photon. KERMA is the sum of the kinetic energies of these electrons set into motion by the initial photon. All of these secondary electrons will go on to produce ionizations and excitations. The energy deposited by these secondary electrons is dose and the energy deposition will tend to occur deeper than the KERMA transfer.

2B: INTERAKCE NEUTRONŮ

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



INTERAKCE NEUTRONŮ



2B_1: ROZPTYL NEUTRONU NA JÁDŘE

• 2B_1A: 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.



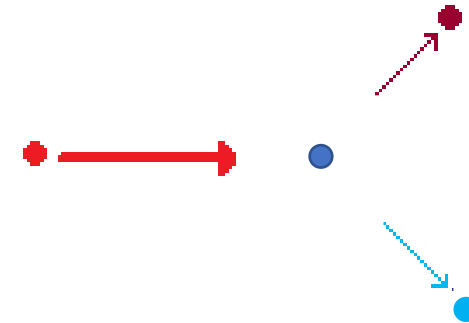
INTERAKCE NEUTRONŮ

2B_1: ROZPTYL NEUTRONU NA JÁDŘE

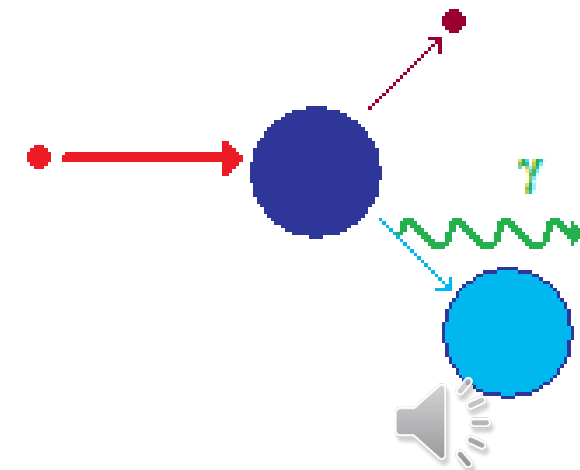
2B_1B: NEPRUŽNÝ ROZPTYL (n, n')

- 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



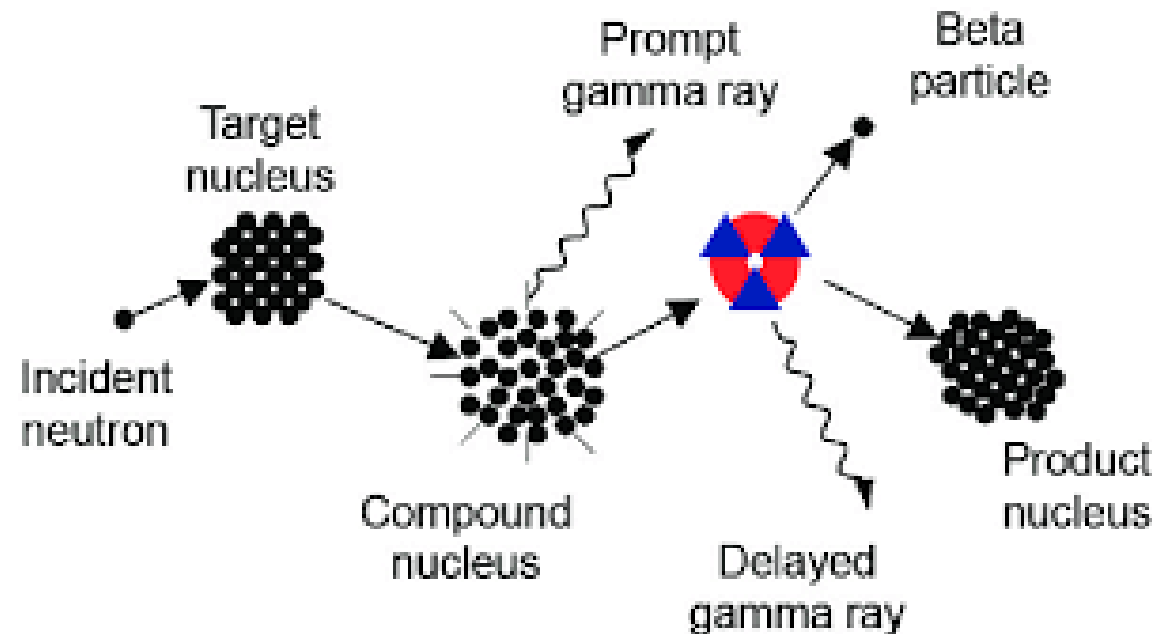
nepružný rozptyl



2B_2: INTERAKCE NEUTRONŮ: ZÁCHYT NEUTRONU JÁDREM

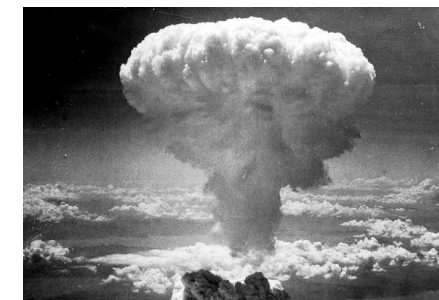
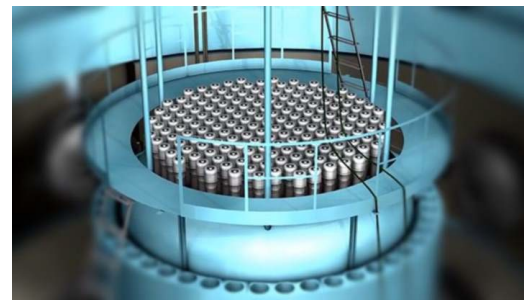
2B_2.1: RADIČNÍ ZÁCHYT NEUTRONU (n, γ)

- n^0 je zachycen jádrem a jeho energie se předá jádru ve formě zvýšení jeho potenciální energie.
- K deexcitaci jádra pak dochází **vyzářením fotonu γ**
- jádro se **přemění na nuklid s N+1**, ten může být stabilní nebo radioaktivní



INTERAKCE NEUTRONŮ

2B_2: ZÁCHYT NEUTRONU JÁDREM

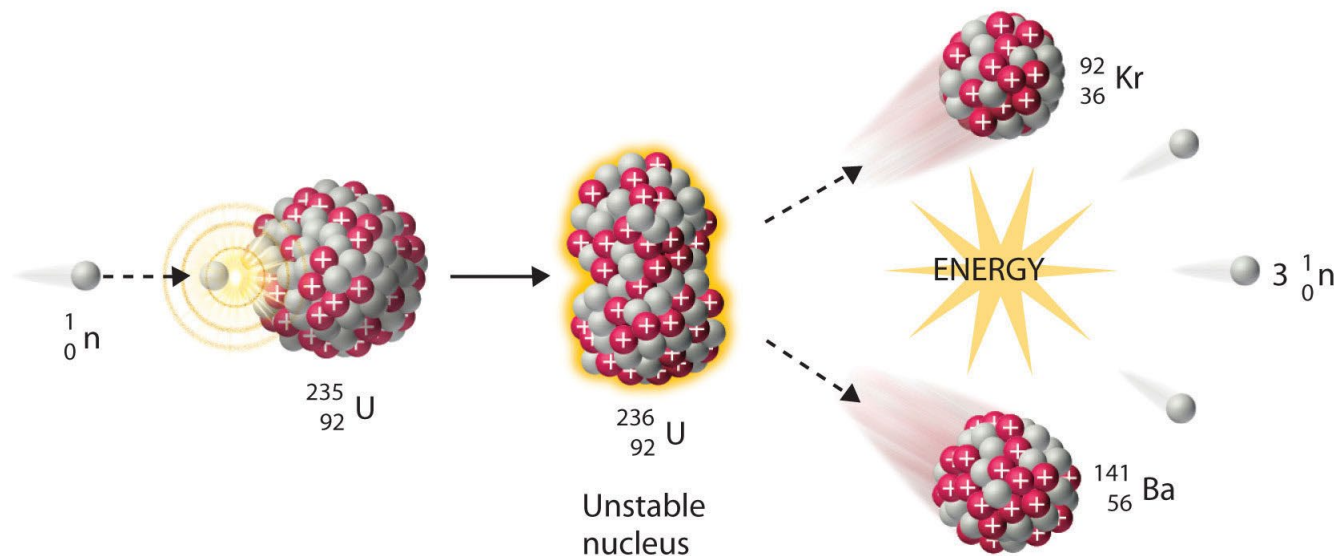


2B_2.2: Neutronové jaderné reakce s emisí nabitých částic

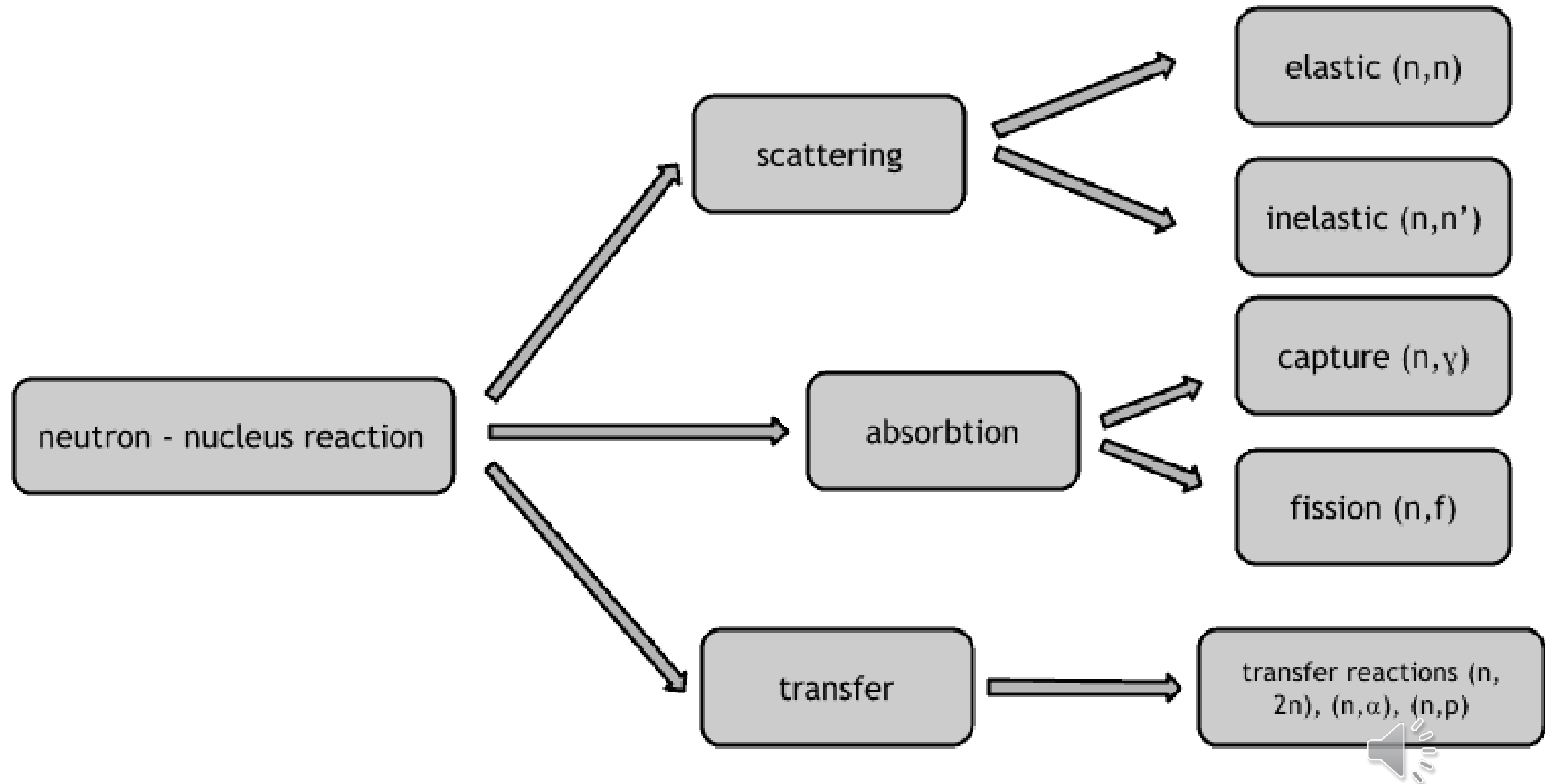
n^0 je zachycen jádrem ze kterého je **emitována částice** (alfa, p^+ , $n^0 + p^+$ apod.)

2B_2.3: ŠTĚPENÍ JADER (n,f)

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



INTERAKCE NEUTRONŮ



RADIAČNÍ BIOFYZIKA

VELIČINY a JEDNOTKY

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

