

Základy fyziky v nukleární medicíně

Ondřej Stanický

Výstupy z učení

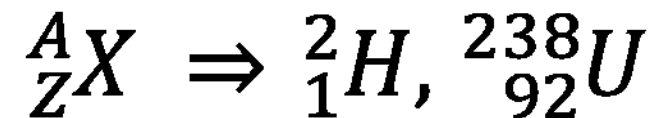
- Student se seznámí se základními fyzikálními principy.
- Student se seznámí s druhy radioaktivity.
- Student se seznámí s druhy interakcí záření s látkou.

Stavba atomů

- Jádro, obal
- Protony, neutrony, elektrony
- Protonové číslo – Z
- Nukleonové číslo – A
- Nuklid (Z,A), Izotopy (Z), izobary (A), izomery (E)

protonové (atomové) číslo Z → počet protonů

nukleonové (hmotnostní) číslo A → protony + neutrony



Radioaktivita a radionuklidy

- Radioaktivita je jev, kdy se jádra atomů určitého prvku samovolně přeměňují na jádra jiného prvku, přičemž je emitováno vysokoenergetické záření.
- Jádra vykazující tuto vlastnost se nazývají radionuklidy.
- Látky a předměty obsahující radionuklidy se nazývají radioaktivní zářiče

přeměna nestabilních jader je provázena:

- emisí částice
- emisí kvanta elektromagnetického záření
- zachycením elektronu z elektronového obalu

- nejtěžším stabilním izotopem je Bismut
- všechna těžší jádra jsou nestabilní a samovolně se rozpadají na jádra lehčí, která jsou stabilní nebo ke stabilní konfiguraci vedou → **přirozená radioaktivita**.

The image shows a standard periodic table of elements. An arrow points from the text $^{209}_{83}\text{Bi}$ to the element Bismuth (Bi) in the periodic table. The periodic table includes atomic numbers, element symbols, and names. The element Bismuth is located in the 8th period, 15th group. The isotope notation $^{209}_{83}\text{Bi}$ indicates a mass number of 209 and an atomic number of 83.

1	2	13	14	15	16	17	18														
1 H 1.008	2 He 4.003	5 B 10.81	6 C 12.01	7 N 14.01	8 O 16.00	9 F 19.00	10 Ne 20.18														
3 Li 6.941	4 Be 9.012	11 Na 22.99	12 Mg 24.31	13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.97	16 S 32.07	17 Cl 35.45	18 Ar 39.95												
19 K 39.10	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.88	23 V 50.94	24 Cr 52.00	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.93	28 Ni 58.69	29 Cu 63.55	30 Zn 65.39	31 Ga 69.72	32 Ge 72.61	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.90	36 Kr 83.80				
37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.91	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.94	43 Tc 98.91	44 Ru 101.1	45 Rh 101.1	46 Pd 106.4	47 Ag 107.9	48 Cd 112.4	49 In 114.8	50 Sn 118.7	51 Sb 121.8	52 Te 127.6	53 I 126.9	54 Xe 131.3				
55 Cs 132.9	56 Ba 137.3	57 La 138.9	58 Ce 140.1	59 Pr 140.9	60 Nd 144.2	61 Pm 146.9	62 Sm 150.4	63 Eu 152.0	64 Gd 157.3	65 Tb 158.9	66 Dy 162.5	67 Ho 164.9	68 Er 167.3	69 Tm 168.9	70 Yb 173.0	81 Tl 204.4	82 Pb 207.2	83 Bi 209.0	84 Po 209.0	85 At 210.0	86 Rn 222.0
87 Fr 223.0	88 Ra 226.0	89 Ac 227.0	90 Th 232.0	91 Pa 231.0	92 U 238.0	93 Np 237.0	94 Pu 244.1	95 Am 243.1	96 Cm 247.1	97 Bk 247.1	98 Cf 251.1	99 Es 252.0	100 Fm 257.1	101 Md 259.1	102 No 259.1	111 Uut 289	112 Uuq 289	113 Uup 289	114 Uuh 289	115 Uus 289	116 Uuo 289

Radioaktivní přeměna

- mění chemickou podstatu látky, přeměnou se mění složení atomového jádra
- je nezávislá na vnějších podmínkách → rychlost radioaktivní přeměny daného radionuklidu nelze nijak ovlivnit, zpomalit nebo zastavit
- je doprovázena emisí až čtyř druhů záření
 - α (jádra helia)
 - β (elektrony, pozitrony)
 - γ (fotony)
- pro charakteristiku rychlosti radioaktivní přeměny jádra se používá pojem **poločas přeměny** → $T_{1/2}$

Poločas přeměny $\rightarrow T_{1/2}$

- je doba, za kterou se přemění polovina z celkového počtu atomových jader ve vzorku
- je charakteristický a konstantní pro konkrétní radionuklid
- čím je poločas přeměny $T_{1/2}$ kratší, tím rychleji se radionuklid přeměňuje
- nabývá hodnot od zlomku sekundy až po milióny let

Aktivita jako veličina – počet radioaktivních přeměn v daném množství radioaktivní látky za jednotku času

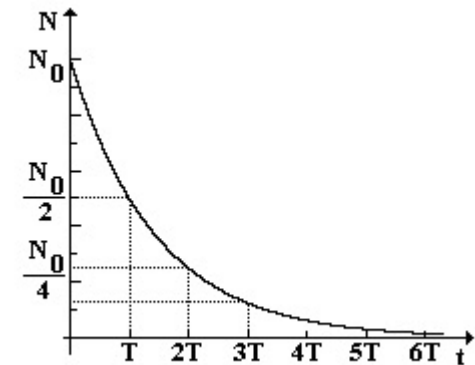
- Jednotka becquerel [Bq], Pozn.: dříve se používala jednotka 1 curie = 1 Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq (37 GBq)
- Hmotnostní (měrná) aktivita a_m [Bq.kg⁻¹] Pozn.: podíl aktivity a celkové hmotnosti látky
- Objemová aktivita a_v [Bq.m⁻³]
- plošná aktivita a_s [Bq.m⁻²]

Exponenciální zákon radioaktivního rozpadu

- aktivita radionuklidu klesá s časem podle vztahu:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 2^{-t/T_{1/2}} = A_0 2^{-0,693/T_{1/2} \cdot t}$$

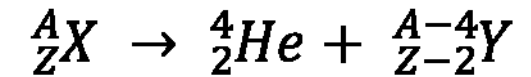
$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$



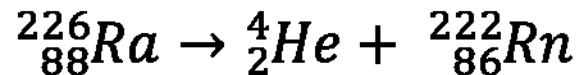
[4]

Druhy radioaktivních přeměn – přeměna α

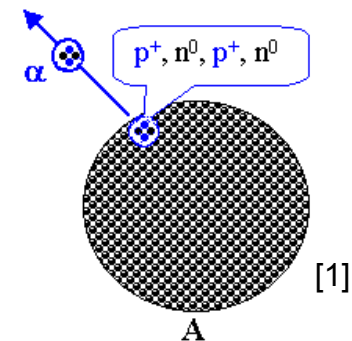
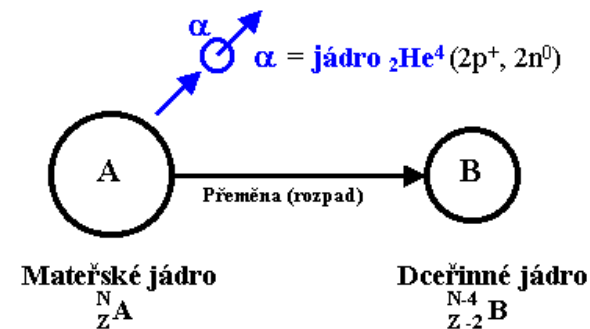
- radioaktivita α se vyskytuje pouze u nejtěžších jader
- mateřské jádro emituje částici alfa (jádro hélia)
- po přeměně α vzniká dceřiné jádro, které se v periodické tabulce prvků nachází o dvě místa vlevo od původního mateřského jádra
- dvojnásobný kladný náboj \rightarrow silný ionizační účinek na látku \rightarrow dosah částic α je velmi krátký (cca 0,03 mm)
- interakce s prostředím: ionizace, excitace atomů
- Využití jen pro terapii \rightarrow ^{226}Ra



Př.:



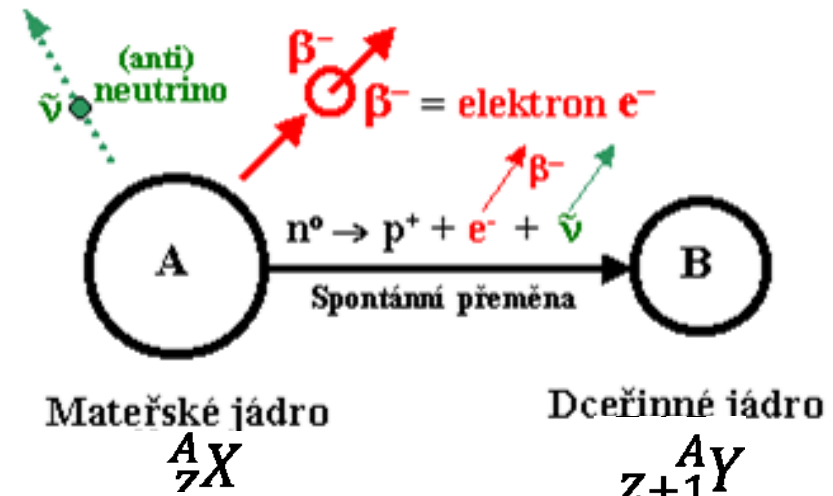
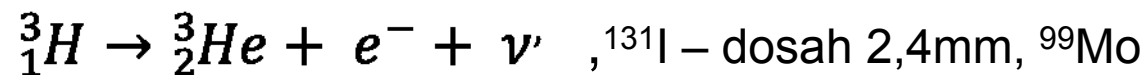
Radioaktivita α



Druhy radioaktivních přeměn – přeměna β^-

- elektron + antineutrino
- při přeměně β^- se hmotnostní číslo prvku nemění, protonové číslo se zvětší o 1, prvek se posune o jedno místo vpravo v periodické tabulce prvků
- má spojité energetické spektrum \rightarrow obsahuje částice s energiemi od nuly až po určitou maximální energii, která je pro daný radionuklid charakteristická
- interakce s prostředím: ionizace, excitace atomů, tvorba brzdného záření
- e^- jsou lehké částice, které jsou při průchodu látkou rozptylovány a jejich dráha může být značně klikatá \rightarrow dosah e^- v látce má velký rozptyl
- menší ionizační účinky než záření α

Př.:



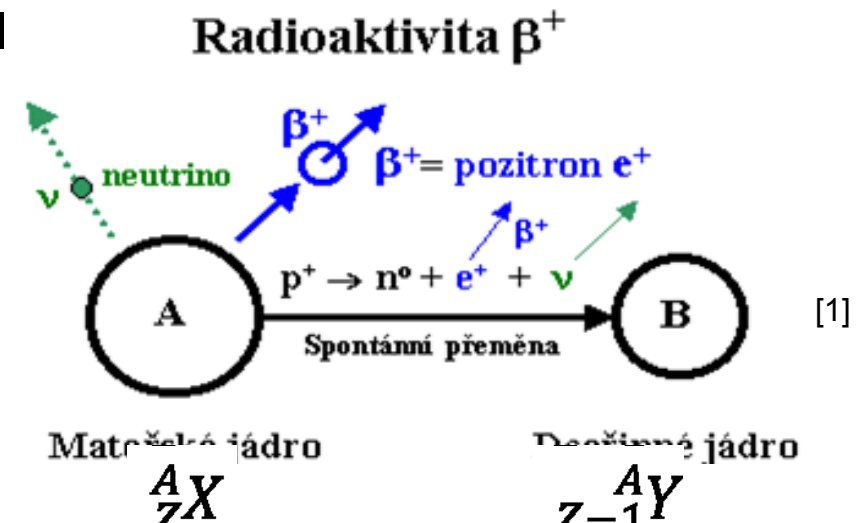
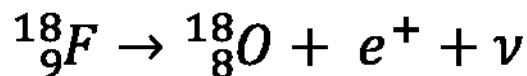
[1]

Druhy radioaktivních přeměn – přeměna β^+

Přeměna β^+

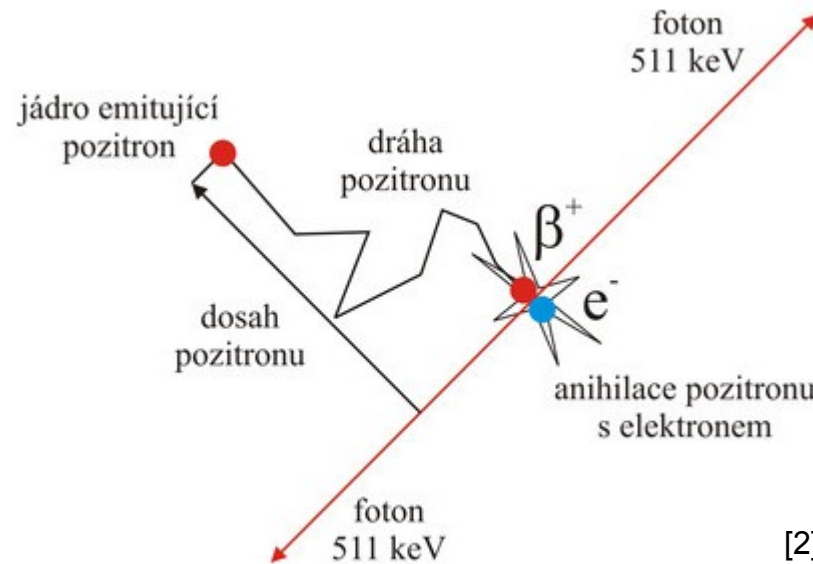
- pozitron + neutrino
- při přeměně β^+ se hmotnostní číslo prvku nezmění, protonové číslo se zmenší o 1, prvek se posune o jedno místo vlevo v periodické soustavě prvků.
- má spojité energetické spektrum \rightarrow obsahuje částice s energiemi od nuly až po určitou maximální energii, která je pro daný radionuklid charakteristická
- interakce s prostředím: ionizace, excitace atomů, po zabrzdění anihilační záření
- e^+ jsou lehké částice, které jsou při průchodu látkou rozptylovány a jejich dráha může být značně klikatá \rightarrow dosah e^+ v látce má velký rozptyl
- menší ionizační účinky než záření α

Př.:



Anihilační záření

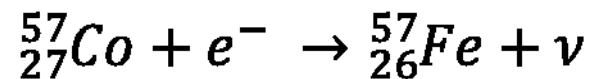
- e^+ se zpomaluje ve srážkách s elektrony atomových obalů, na konci své dráhy se spojí s elektronem, dochází k anihilaci a vznikají dva anihilační fotony s energií 511 keV
- dráha e^+ ve tkáni je velmi klikatá, **dosahem** této částice, který je kratší než dráha, se rozumí vyznačená přímka



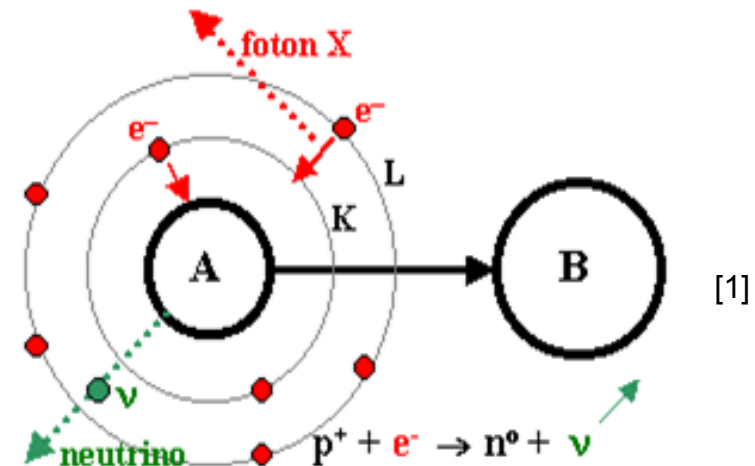
Druhy radioaktivních přeměn – přeměna elektronovým záchytem

- je alternativním procesem k rozpadu β^+ u jader s přebytkem protonů
- neutrino + foton charakteristického záření X, nebo emise Auger elektronů
- hmotnostní číslo prvku nezměněno, protonové číslo se zmenší o 1, prvek se posune o jedno místo vlevo
- jedná se o záchyt elektronu z elektronového obalu (nejčastěji elektronu ze sféry K) do jádra
- uprázdněné místo v K-orbitu se doplní elektronem z vyššího orbitu a přebytek energie se vyzáří ve formě fotonu
- má čárové spektrum → daný radionuklid emituje pouze fotony s určitými energiemi, které jsou pro jeho přeměnu charakteristické

Př.:

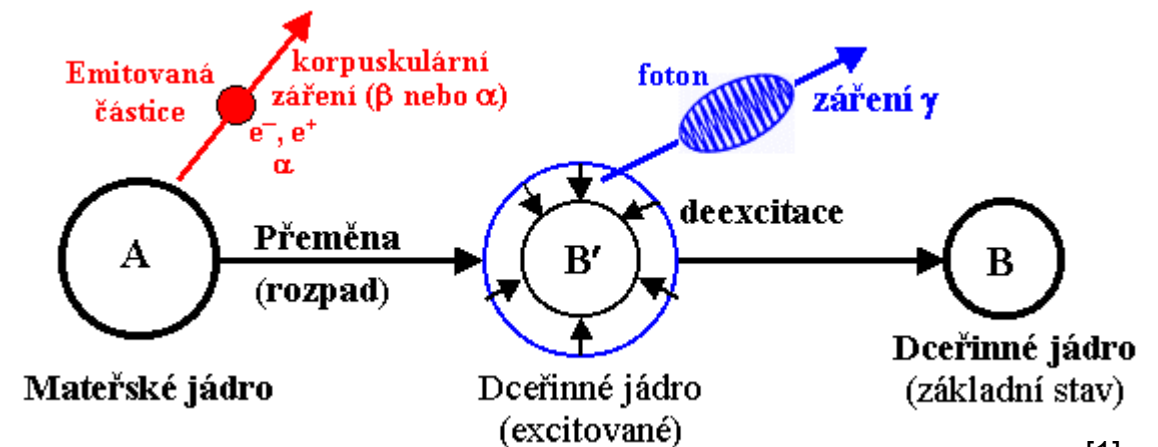


Diagnostické zobrazovací metody (VLDI7X1c)



Druhy radioaktivních přeměn – přeměna γ

- po jaderné přeměně (α, β) zpravidla není dceřiné jádro ve svém základním stavu, ale nachází se ve stavu excitovaném (na vyšší energetické hladině) \rightarrow vrácením do základního stavu se přebytek energie vyzáří ve formě fotonu
- protonové ani hmotnostní číslo prvku se nemění
- Čisté gama zářiče v přírodě neexistují – příprava ^{99m}Tc z ^{99}Mo , čárové spektrum
- má čárové spektrum \rightarrow daný radionuklid emituje pouze fotony s určitými energiemi, které jsou pro jeho přeměnu charakteristické
- interakce s prostředím: fotoelektrický jev, Comptonův rozptyl, tvorba elektron-pozitronových párů.



[1]

Interakce záření s látkou – přímo ionizující záření

- elektricky nabitě částice interagující prostřednictvím Coulombovských sil → **elektron, proton, pozitron, částice alfa . . .**
- ionizací (vyražením elektronu z atomového obalu) a excitací (vybuzení e^- na vyšší energetickou hladinu) částic
- Částice alfa – silná ionizace
- Částice beta → Vznik brzdného záření – zejména u beta- částic, závislost na protonovém čísle
- Anihilace u beta+

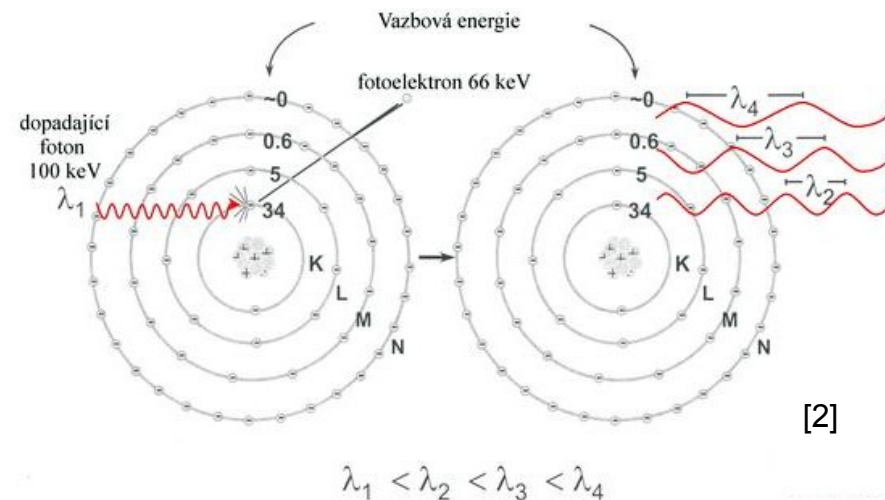
Interakce záření s látkou – nepřímo ionizující záření

- nenabité částice způsobí emisi jiných částic, které teprve ionizují a excitují další částice – fotony gama a RTG záření, neutrony
- interakce s prostředím: Fotoefekt, Comptonův rozptyl, tvorba elektron-pozitr. párů, jaderný fotoefekt
- rozmezí energií (70 – 511keV) používaných v nukleární medicíně přichází v úvahu především interakce fotoefektem a Comptonovým rozptylem

Interakce záření s látkou – nepřímo ionizující záření

Fotoefekt

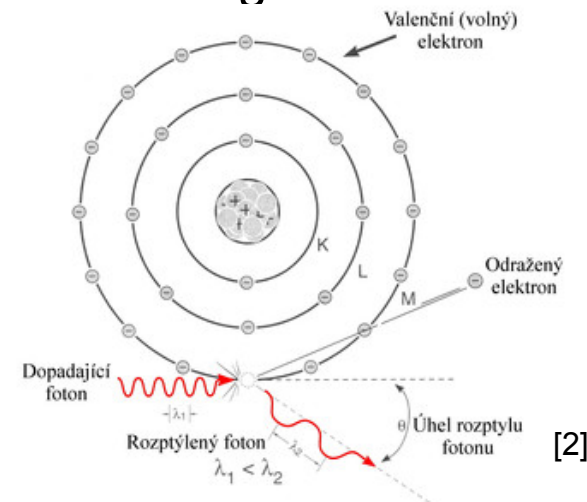
- foton X nebo γ interaguje s elektronem vázaným v atomovém obalu, na některé z vnitřních slupek atomu - nejčastěji K, L nebo M, předá mu veškerou svou energii a zaniká
- na místo uprázdněné přeskočí elektron z vyšší slupky v atomovém obalu a energetický rozdíl se vyzáří ve formě charakteristického rentgenového záření
- projevuje se hlavně u fotonů nižších energií a látek s vysokým atomovým číslem.



Interakce záření s látkou – nepřímo ionizující záření

Comptonův rozptyl

- vzniká pokud se foton X nebo γ srazí s volným nebo slabě vázaným elektronem, kterému předá část své energie a bude pokračovat ve svém pohybu ve změněném směru s nižší energií
- může se několikrát opakovat, až foton opustí látku, nebo ztratí tolik energie že zaniká fotoefektem
- odražený elektron se dále pohybuje prostředím \rightarrow ionizace a excitace
- převládajícím typem interakce gama záření středních energií s látkami s nízkým atomovým číslem



Interakce záření s látkou – nepřímo ionizující záření

- Comptonův rozptyl
 - je v radiodiagnostice a nukleární medicíně nežádoucím jevem → způsobuje degradaci obrazu rozmazáním a snížením kontrastu
- Fotoelektrický jev
 - je nežádoucí v nukleární medicíně dochází ke ztrátě obrazové informace
 - v radiodiagnostice nám umožňuje zobrazení rozdílného zeslabení fotonů tkáněmi s rozdílnou hustotou, čímž je vytvořen obraz

Take home message

- Poločas přeměny je doba ze kterou přemění polovina atomových jader ve vzorku.
- Pokles aktivity se řídí exponenciálním zákonem radioaktivního rozpadu.
- Alfa, beta, gama jsou základní druhy radioaktivních přeměn.
- Nepřímo ionizující záření interaguje s látkou fotoelektrickým jevem, nebo Comptonovým rozptylem.

Seznam citací

- [1] Ullmann V. <http://www.astronuklfyzika.cz/>
- [2] PTÁČEK, Jaroslav a kol. *old.lf.upol.cz/* [online]. [cit. 21.10.2021]. Dostupný na WWW: <http://old.lf.upol.cz/>
- [3] Autor neznámý: <http://webfyzika.fsv.cvut.cz> [cit. 21.10.2021]. Dostupný na WWW: <http://webfyzika.fsv.cvut.cz/1tab.htm>
- [4] REICHL, Jaroslav; VŠETIČKA, Martin. *http://fyzika.jreichl.com/* [online]. [cit. 21.10.2021]. Dostupný na WWW: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/807-aktivita-zarice-a-rozpadovy-zakon>

MUNI
MED