



Zdravotně
sociální fakulta
Faculty of Health
and Social Sciences

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

**Zdroje a interakce ionizujícího záření v nukleární
medicině pro radiologické asistenty**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program:

SPECIALIZACE VE ZDRAVOTNICTVÍ

Autor: Anna Prchalová

Vedoucí práce: doc. RNDr. Přemysl Záškodný, CSc.

České Budějovice 2021

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci s názvem *Zdroje a interakce ionizujícího záření v nukleární medicíně pro radiologické asistenty* jsem vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské/diplomové práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby bakalářské práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé bakalářské práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 3. 5. 2021

.....

Anna Prchalová

Abstrakt

V současné době není k dispozici edukační text na téma zdroje a interakce ionizujícího záření v nukleární medicíně, který by byl přiměřený fyzikálním znalostem studentů oboru Radiologický asistent a dalších příbuzných oborů. Materiály v České republice, které se zabývají touto problematikou, jsou ve většině případech přepisem vědeckých poznatků a vyžadují od vyučujícího vlastní přípravu, která zajistí, že bude odpřednášená látka pochopena studenty správně. Na základě analýzy současného stavu byly v této bakalářské práci stanoveny následující cíle:

- Cíl 1: Výběr teorie přenosu poznatků na úroveň radiologického asistenta a dalších příbuzných oborů.
- Cíl 2: Na základě teorie kurikulárního procesu zpracovat strukturu fyzikálních základů nukleární medicíny ve formě edukačního textu, který bude respektovat vybranou teorii.
- Cíl 3: Experimentální ověření edukačního textu znalostí respondentů dotazníkovým testem bez aplikace robustní analýzy.
- Cíl 4: Experimentální ověření edukačního textu znalostí respondentů dotazníkovým testem s aplikací robustní analýzy.

Na základě stanovení cílů byly vytyčeny dvě hypotézy:

- Hypotéza 1: Aplikací teorie kurikulárního procesu lze vytvořit edukační text pro studenty oboru "Radiologický asistent" a dalších příbuzných oborů.
- Hypotéza 2: Znalosti respondentů o zdrojích a interakcích ionizujícího záření v nukleární medicíně budou mít rozdělení blízké rozdělení normálnímu.

Pro tuto bakalářskou práci byla zvolena teorie kurikulárního procesu jako forma přenosu poznatků z vědy do edukační oblasti. Teorie kurikulárního procesu byla jako první nastíněna v úvodu do teoretické části bakalářské práce, dále bylo zapotřebí uvést fyzikální podstatu radionuklidové diagnostiky a terapie, která zahrnuje popis atomového jádra, radioaktivity, druhy záření a interakce jednotlivých druhů záření s prostředím. V práci jsou také zmíněny a popsány následující fyzikální zákony: Rozpadový zákon včetně Geiger-Nuttalova zákona a Absorpční zákon. Následně byly zmíněny konkrétní příklady a využití radionuklidů v diagnostice a terapii.

Jedním z cílů bylo zpracování edukačního textu, který byl předán adresátům edukace, kterými bylo třicet šest studentů oboru „Radiologický asistent“. Pro ověření získaných znalostí z edukačního textu byl vytvořen test čítající osmnáct otázek

s výběrem ze čtyř možností, z nichž byla pouze jedna odpověď správná. Pro statistické vyhodnocení testů byly využity metody deskriptivní a matematické statistiky.

Na základě výsledků statistického šetření byly obě stanovené hypotézy potvrzeny a všechny čtyři cíle lze považovat za splněné. Lze usuzovat, že edukační text i test budou přínosným materiálem pro výuku fyzikálních základů radionuklidové diagnostiky a terapie pro radiologické asistenty a obory příbuzné. Lze doporučit zkvalitnění studijní přípravy studentů v oblastech, kde bylo dosaženo slabších znalostí. Také by bylo možno navrhnout navazující práce, zabývající se obdobnou tematikou jako například: Výhody a nevýhody radionuklidové diagnostiky oproti ostatním diagnostickým metodám.

Klíčová slova:

Nukleární medicína; radioaktivita; zdroje a interakce ionizujícího záření; radiologický asistent; kurikulární proces

Abstract

Currently there is not available any educational text on the subject of sources and interactions of ionizing radiation in nuclear medicine that would be adequate to the knowledge of students in the field of Radiologic Assistant and other related disciplines. Study materials in Czech Republic that address this field of subject are usually mere transcripts of scientific knowledge and they need to be adjusted by the presenter to be correctly understood by students. Following goals were determined on the basis of an analysis of the current state:

- Goal 1: The selection of theory of knowledge transfer to the level of “Radiological Assistant“ and other related fields.
- Goal 2: The creation of the structure of physical fundamentals of nuclear medicine in the form of educational text that respects the chosen theory.
- Goal 3: Experimental verification of educational text knowledge using questionnaire survey without application of robustness analysis.
- Goal 4: Experimental verification of educational text knowledge using questionnaire survey with application of robustness analysis.

There were two hypotheses formulated on the basis of setting previous objectives:

- Hypothesis 1: The application of theory to the curriculum process can create educational text for students of Radiological Assistant and students of other related fields.
- Hypothesis 2: The knowledge of the learners will have a theoretical distribution of the near normal distribution in the area of sources and interactions of ionizing radiation in nuclear medicine,

The curricular process theory was chosen for this thesis as a form to transfer the knowledge from science to educational field. The curricular process theory was briefly described in the introduction to the theoretical part of this thesis, afterwards there was necessary to mention the physical fundamentals of radionuclide diagnostics and therapy which is comprised of description of atom structure, radioactivity, types of ionizing radiation and interaction of radiation with the matter. There are also stated and described subsequent physical laws: Radioactive decay law including Geiger–Nuttall law and Absorption law. Subsequently there are also shown examples of application of radionuclides in diagnostics and therapy.

Both formulated hypotheses were affirmed on the basis of the achieved results of the statistic research and all four goals can be considered fulfilled. It can be concluded that the educational text and the test will be a contributive educational material for physical fundamentals of radionuclide diagnostics and therapy for radiology sciences and related disciplines. It is also possible to recommend better study preparation of students in area of poor knowledge. Also it is possible to recommend follow-up work that would concern similar topic, for example: Advantages and disadvantages of radionuclide diagnostics as distinct from other diagnostic methods.

Keywords:

Nuclear medicine; radioactivity; sources and interactions of ionizing radiation; radiologic assistant; curricular process

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala panu doc. RNDr. Přemyslu Záškodnému, CSc. za odborné vedení mé bakalářské práce. Dále děkuji všem respondentům, kteří věnovali svůj čas k vyplnění dotazníků pro mé výzkumné šetření.

Obsah

	Úvod.....	10
1.	Teoretická část	11
1.1	Teorie kurikulárního procesu.....	11
1.1.1	Metody kurikulárního procesu.....	12
1.2	Historie nukleární medicíny.....	13
1.3	Fyzikální podstata radionuklidové diagnostiky a terapie	14
1.3.1	Stavba atomového jádra.....	14
1.3.2	Radioaktivita.....	15
1.3.3	Rozpadové řady	15
1.3.4	Druhy záření	16
1.3.5	Rozpadový zákon.....	17
1.3.6	Absorpční zákon	19
1.4	Interakce ionizujícího záření s prostředím.....	20
1.4.1	Fotoelektrický jev	22
1.4.2	Comptonův jev.....	23
1.4.3	Obrácený anihilační jev	25
1.5	Veličiny a jednotky jaderného záření	26
1.6	Radionuklidová diagnostika	29
1.7	Radionuklidová terapie	30
2.	Hypotézy, cíle a metodika výzkum.....	32
2.1	Hypotézy a cíle	32
2.2	Metodika výzkumu	32
2.3	Statistické vyhodnocení	34
2.3.1	Formulace statistického šetření.....	34
2.3.2	Škálování	35
2.3.3	Měření.....	36
2.3.4	Elementární statistické zpracování	36
2.4	Metody matematické statistiky	38

3.	Výsledky	40
3.1	Statistické vyhodnocení dotazníku (bez aplikace robustní analýzy)	40
3.1.1	Formulace statistického šetření.....	40
3.1.2	Škálování a měření.....	40
3.1.3	Elementární statistické zpracování	41
3.1.4	Neparametrické testování – Pearsonův test χ^2	44
3.2	Statistické vyhodnocení dotazníku (s aplikací robustní analýzy).....	47
3.2.1	Formulace statistického šetření.....	47
3.2.2	Škálování a měření.....	48
3.2.3	Elementární statistické zpracování s použitím robustní analýzy	48
3.2.4	Neparametrické testování – Pearsonův test χ^2	49
4.	Diskuse.....	50
4.1	Diskuse k ověření hypotéz a splnění cílů.....	50
4.2	Diskuse k výsledkům dotazníkového šetření.....	51
4.2.1	Dotazníkový test znalostí respondentů bez aplikace robustní analýzy.....	51
4.2.2	Dotazníkový test znalostí respondentů s aplikací robustní analýzy	52
4.2.3	Ověření hypotézy a splnění cílů aplikovaného kvantitativního výzkumu	53
5.	Závěr	54
6.	Seznam literatury	56
7.	Seznam obrázků, grafů a tabulek.....	59
8.	Přílohy.....	60

Úvod

Nukleární medicína je lékařská obor, který se zabývá diagnostikou a léčbou za použití radioaktivních zářičů. Tyto zářiče jsou aplikovány do vnitřního prostředí lidského organismu a jejich rozložení je sledováno pomocí takzvaných scintilačních detektorů. Oproti ostatním diagnostickým metodám umožňuje radionuklidová diagnostika sledování funkčního stavu orgánu a jeho metabolické aktivity. Terapeutické metody umožňují úspěšnou léčbu některých nádorových ale i nenádorových onemocnění.

V současné době není dostupný vhodný edukační text na téma Zdroje a interakce ionizujícího záření v nukleární medicíně, který by byl přiměřený fyzikálním znalostem studentů oboru Radiologický asistent a dalších příbuzných oborů. V této bakalářské práci bude snahou zpracovat aplikací kurikulárního procesu ucelený edukační text, který by projednával o radionuklidové diagnostice a terapii pro radiologické asistenty a příbuzné obory na základě analýzy současného stavu vědeckého poznání ve zkoumané oblasti. Vybraná problematika je zpracována v teoretické části práce a byla upravena pro vybranou skupinu adresátů ve formě edukačního textu. Srozumitelnost textu byla ověřena statistickým šetřením za použití vědomostního testu, který respektoval téma edukačního textu a byl proveden u vybrané skupiny studentů oboru Radiologický asistent.

1. Teoretická část

1.1 Teorie kurikulárního procesu

Termín „kurikulum“ vychází z latinského slova *curriculum* a znamená běh, závodní dráha, vůz. V přeneseném významu pak vyjadřuje posun po plánované trase. (Maňák et al., 2008)

Kurikulum je v pedagogice široký pojem, který můžeme chápat jako obsah edukačního systému a proces vzdělávání se, který je realizován v učebním prostředí a zahrnuje jeho osvojování a také hodnocení. V současnosti se obecně uvádí mnoho definic kurikula dle různých pojetí vzdělávání a jednotlivých výkladů autorů. (Maňák et al., 2008; Metodický portál...,2011)

Obsah kurikula lze dělit do následujících dimenzí (Maňák et al., 2008):

1. Dimenze ideová: cíl, vize, plány.
2. Dimenze obsahová: obsah vzdělávání (v případě této bakalářské práce se jedná o zpracování edukačního textu).
3. Dimenze metodická: realizace výuky, vyučovací styl učitele, didaktické prostředky.
4. Dimenze organizační: podmínky a okolnosti, za kterých je realizována výuka. (Maňák et al., 2008)

Formy kurikula:

- Konceptuální kurikulum – koncept toho, co má být obsahem edukace ve školách.
- Zamýšlené kurikulum – plánované cíle, obsah vzdělávání (v podobně učební osnovy, učebnic).
- Projektové kurikulum – promítnutí do učebního textu.
- Implementované kurikulum 1 – příprava na zprostředkování poznatků obsažených v projektovém kurikulu.
- Implementované kurikulum 2 – výsledky zprostředkování poznatků výuky, kontrola výuky projektového kurikula prostřednictvím výsledků.

- Dosažené kurikulum – aplikovatelné výsledky obsahu výuky, osvojení učiva adresáty. 26, 2015)

1.1.1 *Metody kurikulárního procesu*

Kurikulárním procesem fyziky se pak rozumí posloupnost transformačně na sebe navazujících variantních forem kurikula a umožňuje srovnání výsledků transformací fyzikálního poznatku s variantními formami existence obsahu vzdělávání. 26, 2015)

Spojení kurikulárního procesu fyziky s transformacemi v didaktické komunikaci fyziky lze pak popsat následujícím schématem 26, 2015):

- Transformace T^1 – **Komunikační transformace**. Vstup T^1 : Vědecký systém fyziky → Výstup T^1 : Sdělitelný vědecký systém fyziky jako konceptuální kurikulum.
- Transformace T^2 – **Obsahová transformace** Vstup T^2 : Sdělitelný vědecký systém fyziky jako konceptuální kurikulum → Výstup T^2 : Didaktický systém fyziky a jeho učivo jako zamýšlené kurikulum.
- Transformace T^3 – **Kurikulární transformace** Vstup T^3 : Didaktický systém fyziky a jeho učivo jako zamýšlené kurikulum → Výstup T^3 : Výukový projekt fyziky a jeho učebnice a připravenost učitele na výuku jako projektové kurikulum a implementované kurikulum 1.
- Transformace T^4 – **Edukační transformace** Vstup T^4 : Výukový projekt fyziky a jeho učebnice a připravenost učitele na výuku jako projektové kurikulum a implementované kurikulum 1 → Výstup T^4 : Výsledky výuky fyziky jako implementované kurikulum 2.
- Transformace T^5 – **Aplikační transformace**. Vstup T^5 : Výsledky výuky fyziky jako implementované kurikulum 2 → Výstup T^5 : Aplikovatelné výsledky výuky fyziky jako dosažené kurikulum.

(Záškodný, 2015)

Fyzikální poznatky pro tuto práci prodělávají během kurikulárního procesu několik významných transformací z úrovně vědecké až po transformaci na úroveň edukační. Transformované poznatky slouží jako vhodný výukový materiál adresovaný studentům i laické veřejnosti. Dle výše uvedeného schématu se bude tvorba této bakalářské práce

pohybovat na úrovních konceptuálního, zamýšleného a projektového kurikula a uskuteční se tak transformace T^2 a T^3 . (Záškodný, 2021a; Záškodný, 2021b)

1.2 Historie nukleární medicíny

Nukleární medicína je spojována s dlouhou historií, na které se podíleli vědci z mnoha odlišných oborů od fyziky, chemie až po technické odvětví vědy. Tato multidisciplinární účast znamenala pro historiky obtížné určení prvních počátků nukleární medicíny. Nicméně vznik nukleární medicíny se obecně pojí s rokem 1934, kdy byla objevena umělá radioaktivita, a s rokem 1946, kdy byli poprvé radionuklidy využity pro medicínské účely. Jako radionuklid byl úspěšně použit radioaktivní jód ^{131}I pro léčbu pacienta s pokročilým stádiem karcinomu štítné žlázy. V pozdějších letech se použití radiojodu v medicíně rozšířilo například pro léčbu hypertyreózy, diagnostické zobrazování štítné žlázy nebo také kvantifikaci její funkce. (Lepej et al., 2018; Mandal, 2019)

Rozšíření klinického využití na počátku padesátých let bylo mimo jiné dáno rozvojem přístrojové techniky, která umožňuje právě diagnostiku a terapii pomocí radionuklidů. Byl vyvinut vysoce směrově citlivý detektor a bylo tak umožněno diagnostikovat onemocnění a měřit funkce vyšetřovaných oblastí. V roce 1951 vzniknul pohybový scintigraf, který umožnil zobrazování distribuce radiofarmaka v těle. H.O. Anger zkonstruoval první scintilační gamakameru v roce 1958. Během následujících padesáti let docházelo k obrovskému technologickému rozvoji a scintigrafická vyšetření se rozšířila téměř do všech klinických oborů. (Kupka et al., c2007; Šabata, 2019)



Obr. 1: H.O. Anger, Zdroj: <http://www.theevolutionofimagingtechnology.net/>

1.3 Fyzikální podstata radionuklidové diagnostiky a terapie

Nukleární medicína se zabývá diagnostikou a léčbou pomocí otevřených radioaktivních zářičů, které jsou aplikovány do vnitřního prostředí lidského organismu. Velkou součástí nukleární medicíny jsou právě zobrazovací metody, v menším zastoupení pak laboratorní diagnostika a léčba. (Kupka et al., c2007; Seidl, 2012)

Zobrazovací metoda, která se v nukleární medicíně využívá, se nazývá scintigrafie (podle scintilačního detektoru) nebo gamagrafie (podle záření gama emitovaného radionuklidu). Pomocí scintilačních detektorů jsme schopni detekovat fotony gama záření emitující podaný radionuklid. Ve detektoru dochází k takzvané scintilaci, kdy se přemění energie ionizujícího záření na světelné záblesky, které jsou následně dále elektronicky zpracovávány a vyhodnocovány. Výsledkem jsou pak obrazy prostorového rozložení aplikovaného radionuklidu ve vyšetřované oblasti. (Kupka et al., c2007; Seidl, 2012; Šabata, 2019)

1.3.1 Stavba atomového jádra

Atom se skládá z těžkého jádra, které obsahuje kladně nabitě částice – protony a částice bez náboje – neutrony. Společně se protony a neutrony nazývají nukleony. Okolo jádra se v elektronovém obalu vyskytují záporně nabitě částice – elektrony. Atom je jako celek elektricky neutrální, jelikož se počet elektronů v atomovém obalu rovná počtu protonů v jádře. Atomy, které se od sebe neliší počtem protonů od počtu neutronů, nazýváme nuklidy. (Kupka et al., c2007; Záškodný, 2005)

Každý nuklid je charakterizován protonovým (atomovým) číslem Z , které je rovno počtu protonů v jádře, a hmotnostním (nukleonovým) číslem A , které je dáno součtem počtu protonů a neutronů v jádře. (Banáš, 2018; Trefil, 2021)

Nuklidy, které mají stejný počet protonů, ale různý počet neutronů, se nazývají izotopy. Izotopy mohou být stabilní nebo nestabilní, pro nestabilní je používán název radionuklid. Radionuklidy jsou schopné samovolné radioaktivní přeměny jader, během níž se uvolňuje radioaktivní záření. Každý radionuklid má svůj charakteristický poločas rozpadu, druh přeměny a aktivitu. (Kupka et al., c2007; Trefil, 2021)

Radioaktivní přeměna tedy znamená změnu počtu neutronů nebo protonů a snížení vazebné energie jádra, která se předává emitovanému typu záření. Stabilita nebo

nestabilita jádra závisí na vzájemném uplatnění odpuzivé elektrické síly a jaderné síly. (Kupka et al., c2007)

1.3.2 Radioaktivita

Radioaktivita je jev, kdy dochází k přeměně nestabilních jader určitého radionuklidu v jádra stabilní jiného nuklidu za současného vzniku jaderného záření. Nestabilní jádro, které se přeměňuje, nazýváme mateřské a jádro, které vzniká, dceřiné. (Kupka et al., c2007; Lepej et al., 2018)

Radioaktivita se dělí na přirozenou a umělou. U přirozené radioaktivity dochází k vzniku záření u spontánně se měnících jader, která se objevují v přírodě. Přirozená radioaktivita vzniká bez zásahu člověka. Její příčinou je přechod jader z méně stabilních stavů do stavů stabilnějších. V přírodě můžeme pozorovat pouze takové radionuklidy, které mají dlouhý poločas rozpadu a radionuklidy, které v přírodě stále vznikají. Dlouhodobě existujícími radionuklidy v přírodě jsou například: ${}_{92}^{235}\text{U}$, ${}_{92}^{237}\text{U}$ nebo ${}_{19}^{40}\text{Kr}$. (Přírodní radioaktivita..., 2021; Reichl et al., 2021; World nuclear...,2020)

Umělá radioaktivita vzniká naopak u jader, která byla vyrobena uměle, například v jaderných reaktorech nebo v urychlovači částic. Umělou radioaktivitu lze vyvolat například ostřelováním stabilních jader alfa částicemi a neutrony. (Kupka et al., c2007; World nuclear...,2020)

1.3.3 Rozpadové řady

U těžkých jader nestabilních izotopů může docházet k řadám přeměn, které vedou ke vzniku stabilního prvku a zároveň je vysíláno α záření (alfa rozpad jádra), β záření (beta rozpad jádra) nebo γ záření (gama rozpad jádra). Během radioaktivního rozpadu dojde ke vzniku dceřiného jádra, které se znovu rozpadá na další jádro a tento proces se opakuje, dokud nedojde k vzniku již stabilního atomového jádra. V takovém případě mluvíme o tzv. rozpadové řadě. Přirozeně radioaktivní prvky tvoří celkem čtyři radioaktivní rozpadové řady, které končí stabilními izotopy olova nebo bismutu. (World nuclear...,2020)

- Thoriová rozpadová řada – začíná ${}^{232}\text{Th}$ a končí ${}^{208}\text{Pb}$
- Neptuniová rozpadová řada – začíná ${}^{237}\text{Np}$ a končí ${}^{205}\text{Tl}$

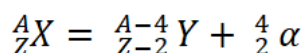
- Uran-radiová rozpadová řada – začíná ^{238}U a končí ^{206}Pb
- Uran-aktiniová rozpadová řada – začíná ^{235}U a končí ^{207}Pb

Je-li vzat v úvahu alfa rozpad, nukleonové číslo při rozpadu klesne o 4, proto všechna atomová jádra dané rozpadové řady mají při dělení hmotnostního čísla číslem 4 vždy stejný zbytek (0, 1, 2 nebo 3). Nukleonová čísla členů thoriové řady odpovídají vzorci $4n$, řady neptuniové vzorci $4n+1$, řady urano-radiové vzorci $4n+2$ a řady aktiniové vzorci $4n+3$. (Záškodný, 2005)

1.3.4 Druhy záření

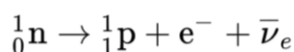
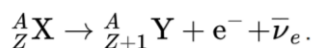
Záření α : Výsledkem α přeměny je emise částice alfa, kterou tvoří 2 protony a 2 neutrony, jedná se o jádro prvku helia. Vzniklé dceřiné jádro má o dva protony méně a dceřiný nuklid se tedy posune v periodické soustavě prvků vzhledem k mateřskému prvku o dvě místa vlevo. Protonové číslo Z se tedy zmenší o 2, nukleonové číslo A se zmenší o 4 ($A = 4, Z = 2$). (Navrátil et al., 2019)

Posouvání prvků v Mendělejevově periodické tabulce v důsledku radioaktivní přeměny je nazýváno **Fajansovým-Soddyho posuvným pravidlem**. (Záškodný, 2005)



Při průchodu prostředím částice alfa silně ionizují i excitují, avšak rychle ztrácejí svojí energii a jejich pronikavost ve vzduchu je několik milimetrů, ve tkáni zhruba 0,03 mm. Záření alfa je proto nebezpečné pouze při vnitřní kontaminaci organismu. (Kupka et al., c2007)

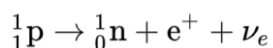
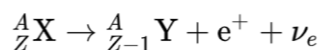
Záření β^- : Při přeměně β^- je emitován z mateřského jádra elektron. Dochází k tomu, že se rozpadá neutron na proton a elektron. Protony zůstávají v jádře, ven vylétají jenom elektrony. Kromě těchto elektronů z jádra vylétá také elektricky nenabitá částice s malou hmotností – antineutrino. Počet protonů se v jádře zvýší o jeden a nově vzniklý dceřiný nuklid se posune v periodické tabulce prvků o jedno místo doprava.



β^- záření se společně s α zářením využívají výhradně pro terapeutické účely díky jejich vysoké absorpci v tkáni, a proto slouží jen k lokálnímu ozáření. (Kupka et al., c2007; Šabata, 2019)

Záření β^+ : Na rozdíl od β^- přeměny (kde jsou z jádra emitovány elektrony) jsou v tomto případě emitovány z jádra pozitrony (antičástice elektronu). Pozitron má stejně jako elektron malou hmotnost a elementární náboj, nicméně kladný. (Navrátil et al., 2019)

Při této přeměně dochází k tomu, že se proton v jádře změní na neutron a pozitron, za vzniku neutrina. Následně je emitován pozitron a neutron zůstává v jádře. Protonové číslo mateřského jádra se zmenší, a tím se vzniklý dceřiný radionuklid posune v periodické tabulce o jedno místo doleva. (Kupka et al., c2007; Podzimek, 2013)



Obecně se částice β pohybují velmi rychle a pronikavost částic je vyšší než u α částic, mohou proniknout materiály s nízkou hustotou nebo malou tloušťkou. Střední dosah v tkáni je cca 1-4 mm. (Kupka et al., c2007)

Záření γ : Zatímco beta a alfa záření jsou jevy prvotními, vysílání gama záření je jevem průvodním. Při přeměně alfa a beta vzniká dceřiné jádro v energeticky excitovaném stavu a při přechodu do základního stavu dochází k uvolnění přebytečné energie vyzářením elektromagnetického záření – záření γ . Při této přeměně se nemění počet protonů ani neutronů v jádře. (Kupka et al., c2007; Navrátil et al., 2019)

Záření γ má krátkou vlnovou délkou s velkou energií a pronikavostí částic. Oproti záření α a β , které jsou korpuskulární, proniká γ záření do materiálu lépe a ke snížení intenzity záření se používají vrstvy materiálů obsahujících těžké prvky jako je například olovo. (Kupka et al., c2007)

Společně s β^+ zářením je záření γ je použitelné pro diagnostické účely, neboť jejich nízká absorpce v těle umožňuje zevní detekci. (Šabata, 2019)

1.3.5 Rozpadový zákon

Rozpadový zákon charakterizuje ubývání mateřského prvku s časem, a to za předpokladu, že pravděpodobnost radioaktivní přeměny jádra během zvoleného

časového intervalu je pro každý mateřský prvek konstantní. Zjednodušeně rozpadový zákon popisuje právě zdroje ionizujícího záření a vznik radioaktivity. (Záškodný, 2005)

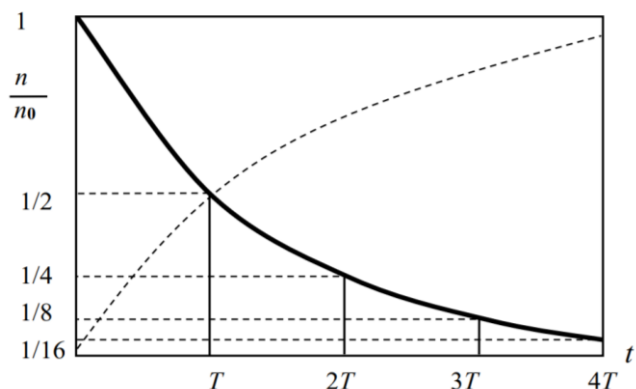
Matematicky je zákon formulován následujícím způsobem:

$$n = n_0 e^{-\lambda t}$$

$$n = n_0 e^{-\frac{\ln 2}{T} t}$$

V rozpadovém zákoně je n – počet mateřských prvků v čase t a n_0 – počet mateřských prvků v čase t_0 . Řecké písmeno λ označuje rozpadovou konstantu, která udává pravděpodobnost, s jakou se mateřský prvek přemění na dceřiný za 1 sekundu. Protože má pravděpodobnostní charakter, obvykle se používá poločas rozpadu $T_{1/2}$, který představuje dobu, za kterou se rozpadne polovina mateřských jader (tj. za čas $t=T$ bude $n = n_0/2$). (Záškodný, 2005)

Na obrázku je graficky znázorněn rozpadový zákon, kde klesající křivka znázorňuje množství mateřských prvků (plná křivka) a rostoucí křivka představuje přibývající množství dceřiných prvků (čárkovaná křivka), vždy v závislosti na počtu poločasů rozpadu:



Obr. 2: Grafické znázornění rozpadového zákona. Zdroj: ZÁŠKODNÝ, P. Přehled základů teoretické fyziky (s aplikací na radiologii). Bratislava: DIDAKTIS, 2005. ISBN 80-89160-25-5.

Např. při přeměnách mateřských prvků během alfa záření dosahují částice alfa rychlosti kolem 2 % rychlosti světla a jejich energie leží zhruba mezi 4 MeV a 9 MeV. Srovnání energie ϵ_α alfa částic s pravděpodobností alfa rozpadu mateřského prvku (tj. s rozpadovou či přeměnovou konstantou λ) ukazuje, že mezi těmito veličinami existuje přímá závislost. (Záškodný, 2005)

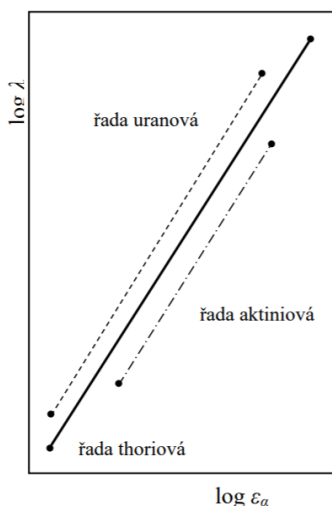
Kvantitativně je tato závislost vystižena Geigerovým-Nuttalovým zákonem:

$$\log \lambda = A_1 + A_2 \log \epsilon_\alpha$$

A_1 a A_2 představují empirické konstanty. energii ϵ_α alfa částic lze s dostatečnou přesností vyjádřit jejich počáteční kinetickou energií T_α . Pak lze Geigerův-Nuttalův zákon přepsat ve tvaru (Záškodný, 2005):

$$\log \lambda = A_1 + A_2 \log T_\alpha$$

Na obrázku číslo 3 je schematicky znázorněno, že konstanta A_2 má zhruba stejnou hodnotu pro všechny přirozené alfa zářiče, avšak konstanta A_1 pro rozpadové řady urano-rádiovou, thoriovou a aktiniovou liší. (Záškodný, 2005)



Obr. 3: Závislost rozpadové konstanty na energii alfa částic. Zdroj: ZÁŠKODNÝ, P. Přehled základů teoretické fyziky (s aplikací na radiologii). Bratislava: DIDAKTIS, 2005. ISBN 80-89160-25-5.

1.3.6 Absorpční zákon

Zatímco rozpadový zákon popisuje ubývání mateřských jader s časem a jejich přeměnu na jádra dceřiná, absorpční zákon charakterizuje úbytek intenzity záření v závislosti na hloubce. Absorpční zákon tak popisuje interakci ionizujícího záření s prostředním, kdy jsou částice záření při těchto interakcích pohlcovány, přeměňovány a rozptylovány. (Záškodný, 2005)

Odvození absorpčního zákona vychází z předpokladu, že pravděpodobnost úbytku původní částice je během zvoleného intervalu tloušťky pro každou částici konstantní (bez ohledu jak na polohu intervalu vzdálenosti na stupnici tloušťky, tak i na energii částice). (Záškodný, 2005)

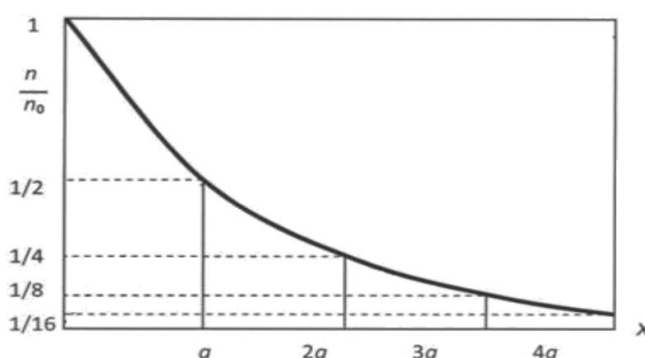
Matematickou podobu absorpčního zákona lze zapsat ve tvarech:

$$n = n_0 e^{-\mu x},$$

$$n = n_0 e^{-\frac{\ln 2}{a} x}$$

V těchto tvarech je n_0 počet částic, který dopadne na rozhraní s danou látkou (tj. pro $x = 0$), n je počet částic, které se dostaly do hloubky x příslušné látky. Počet částic se zmenšuje s rostoucí hloubkou x . Řecké písmeno μ označuje pravděpodobnost úbytku částice v jednotkovém intervalu hloubky (tloušťky) a v absorpčním zákoně se nazývá koeficient absorpce. Písmeno a je polotloušťka (polovrstva) příslušné látky, ve které bude úbytek částic roven polovině původního počtu částic (v hloubce $x = a$ pod rozhraním s danou látkou bude počet neabsorbovaných částic roven polovině původního počtu částic, tj. $n = n_0/2$). (Záškodný, 2005)

Na níže uvedeném obrázku je graficky znázorněn absorpční zákon, kde klesající křivka znázorňuje ubývající počet částic v závislosti na hloubce x pod rozhraním s danou látkou. Hloubka x je vyjadřována v násobcích polotloušťky a příslušné látky, se kterou ionizující záření interaguje. (Záškodný, 2005)



Obr. 4: Grafické znázornění absorpčního zákona. Zdroj: ZÁŠKODNÝ, P. Přehled základů teoretické fyziky (s aplikací na radiologii). Bratislava: DIDAKTIS, 2005. ISBN 80-89160-25-5.

1.4 Interakce ionizujícího záření s prostředím

Jevy, které jsou spojené s průchodem ionizujícího záření prostředím (v nukleární medicíně jde o interakce s tkáněmi), jsou úzce spojeny právě s absorpčním zákonem. Tyto interakce s hmotným prostředím jsou různé pro různé typy ionizujícího záření. (Kupka et al., c2007)

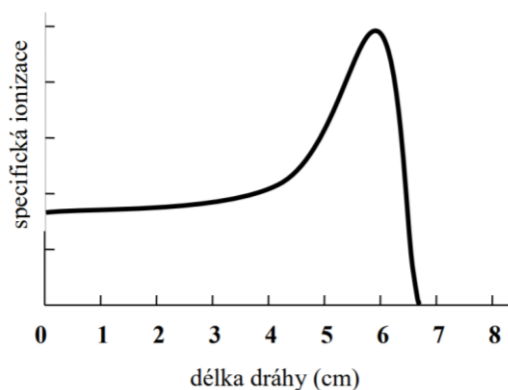
Jedním z faktorů, které interakce ovlivňují, je náboj ionizující částice. Záření lze díky tomu rozdělit na dvě skupiny: přímo ionizující a nepřímo ionizující záření. Přímou

ionizující záření je tok částic, které mají elektrický náboj a mohou tak vyrážet elektrony z atomů přímo – dochází k přímé ionizaci. Jedná se o záření α , β^+ , β^- , protonové záření apod. Nepřímě ionizující záření je naopak tok částic bez náboje, které předávají energii jiným nabitým částicím. Jejich prostřednictvím pak původní nenabitě částice nepřímě ionizují nebo excitují jádra v hmotném prostředí. Mezi tyto druhy záření patří záření γ , rentgenové záření, neutronové záření a další. (Navrátil et al., 2019; Kupka et al., c2007)

- **Interakce záření α**

Alfa záření se pojí především s ionizací (při každé srážce např. s molekulou plynu ztrácí alfa částice energii spotřebovanou na ionizaci). Zhruba polovina energie částice je předána během ionizace a druhá polovina se ztrácí důsledkem excitace. (Kupka et al., c2007)

Pokud bychom zkoumali počet iontových párů (kladných iontů a elektronů) vytvořených alfa částicí například na délce dráhy 1 mm, lze ukázat, že na začátku dráhy si tato specifická ionizace drží přibližně konstantní hodnotu a pomalu stoupá, poté však ke konci doletu částice specifická ionizace vzrůstá více než dvakrát. Křivka této ionizace je popsána tzv. **Braggovou křivkou** a maxima dosahuje několik mm od konce doletu alfa částice. Na obrázku Obr.3 je schematicky znázorněna Braggova křivka pro alfa záření radia C ve vzduchu. (Záškodný, 2005)



Obr. 5: Braggova křivka pro alfa záření radia C ve vzduchu, zdroj: ZÁŠKODNÝ, P. Přehled základů teoretické fyziky (s aplikací na radiologii). Bratislava: DIDAKTIS, 2005. ISBN 80-89160-25-5.

- **Interakce záření β^-**

Elektron při průletu hmotným prostředím atomy ionizuje nebo excituje. Dosah doletu elektronu závisí na jejich energii a objemové hmotnosti prostředí. Při průchodu elektronu prostředím může vznikat brzdné rentgenové záření, které je způsobeno vlivem

silného přibrzdění elektronu při průchodu elektrickým polem jádra i celého atomu. Brzdné záření má spojité spektrum a uplatňuje se při vyšších energiích elektronů. (Sirdik, 2021)

- **Interakce záření β^+**

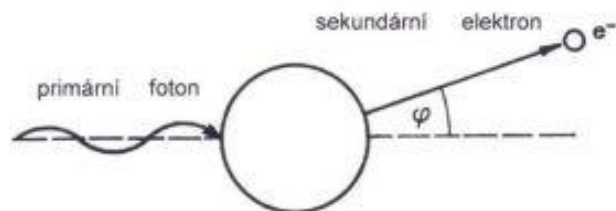
Pozitron se pohybuje podobně jako elektron. Při setkání s elektronem dojde k anihilaci elektronu a pozitronu. Obě částice zaniknou, přitom se vyzáří dva gama fotony. V nukleární medicíně je tento jev běžně pozorován v PET diagnostice. (Kupka et al., c2007; Sirdik, 2021)

- **Interakce záření γ**

Při průchodu hmotným prostředím dochází k zeslabení gama záření prostřednictvím tří jevů – fotoelektrickým jevem, Comptonovým jevem a obráceným anihilačním jevem. Výskyt těchto jevů je závislý na energii záření a na objemové hmotnosti prostředí. Obecně platí, že se zvyšující se energií stoupá podíl Comptonova rozptylu a se zvyšující se hustotou materiálu stoupá podíl fotoelektrického jevu. V nukleární medicíně to znamená, že v měkkých tkáních bude převažovat interakce Comptonovým rozptylem a v materiálech, obsahující prvky s vyšším atomovým číslem (jako např. olovo), bude převažovat fotoelektrický jev. (Bailey et al., 2004; Šabata, 2019)

1.4.1 Fotoelektrický jev

Fotoefekt nastává v případě, že foton gama předá celou svou energii silněji vázanému elektronu v atomovém obalu a tím elektron z obalu uvolní za předpokladu, že je energie fotonu vyšší než vazebná energie elektronu. Tento tzv. fotoelektron (sekundární elektron) je vyražen mimo atom a při průchodu prostředím ionizuje a excituje atomy. Jeho místo v atomovém obalu se zaplní elektronem z jiné slupky obalu, přebytek energie se vyzáří ve formě fotonu (ten má však malou energii a s velkou pravděpodobností bude absorbován rovněž v hmotném prostředí). (Kupka et al., c2007; Šabata, 2019)



Obr. 6: Fotoelektrický jev, zdroj: <http://fbmi.sirdik.org/>

Výklad fotoelektrického jevu byl vysvětlen Einsteinem, který prezentoval jev jako působení fotonů na elektrony v kovu. Vzniklý fotoelektron přijme energii fotonu $h\omega$, která se částečně spotřebovává na uvolnění elektronu z kovu – výstupní práci A . Zbytek energie se přemění na kinetickou energii elektronu T po vystoupení z kovu.

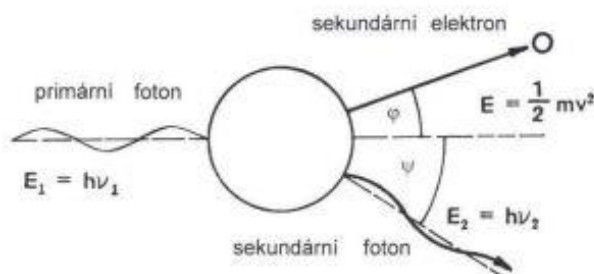
Vztah pro minimální energii, která je potřebná pro vytržení elektronu je následující: $A = h\omega_0$, kde frekvence $\nu_0 = \omega_0/2\pi$ je takzvanou charakteristickou frekvencí kovu. Výsledný tvar Einsteinovy fotoelektrické rovnice má tvar:

$$h\omega = T + h\omega_0$$

(Horský, 1996; Záškodný, 2005)

1.4.2 Comptonův jev

Jedná se o interakci fotonu se slaběji vázaným elektronem, kterému předá foton pouze část své energie. Vyražený Comptonův elektron prochází prostředím a stejně jako při fotoefektu ionizuje a excituje atomy. Foton po srážce pokračuje dále s nižší energií a v jiném směru, může následně ztratit svou energii při fotoefektu nebo znovu Comptonovým rozptylem. V hmotném prostředí může tak docházet k vícenásobnému rozptylu, dokud foton gama neunikne z tohoto prostředí. (Bailey et al., 2004; Sirdik, 2021)



Obr. 7: Comptonův jev, zdroj: <http://fbmi.sirdik.org/>

Teoretický výklad Comptonova jevu podal A. H. Compton díky experimentu s rozptylem rentgenového záření na volných elektronech. Rentgenové záření dopadalo na uhlíkový terčík, v rozptýleném záření bylo následně detekováno kromě záření o původní vlnové délce λ také záření s větší vlnovou délkou $\lambda' > \lambda$. Rozdíl vlnových délek se nazývá Comptonovým posunem $\Delta \lambda = \lambda' - \lambda$. (Horský, 1996)

Předpokládejme, že pro Comptonův rozptyl platí zákony zachování energie a zachování hybnosti.

Zákon zachování energie má následující tvar:

$$E_1 + E_2 = E_3 + E_4$$

$$h\omega + m_0c^2 = h\omega' + mc^2$$

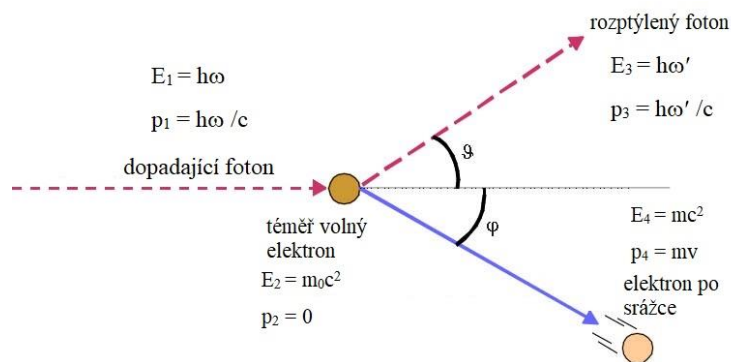
Kde: E_1 je energie fotonu před srážkou, E_2 je energie elektronu před srážkou, E_3 je energie vychýleného fotonu a ω je frekvence původního fotonu a E_4 je energie elektronu po srážce s fotonem.

ω je tedy frekvencí fotonu před interakcí s elektronem a ω' je frekvencí již rozptýleného fotonu, m_0 je klidová hmotnost elektronu před srážkou a m je hmotnost elektronu po srážce. (Horský, 1996; Záškodný, 2005)

Pro pochopení zákona zachování hybnosti lze zapsat zjednodušený vztah pro Comptonův jev následovně:

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_3 + \vec{p}_4$$

Kde: p_1 je vektorem hybnosti fotonu před srážkou s elektronem. Pro hybnost fotonu s frekvencí ω platí vztah $p = h\omega/c$. p_2 je vektor hybnosti téměř volného elektronu před srážkou. Hybnost elektronu je dána vztahem $p = mv$. Jelikož je rychlost téměř volného elektronu nulová, je velikost vektoru $p_2 = 0$. p_3 je vektorem hybnosti fotonu po srážce a p_4 je vektorem hybnosti elektronu po srážce s fotonem. Tato problematika je znázorněna na obrázku č. 8. (Záškodný, 2005)



Obr. 8: Comptonův rozptyl. Zdroj: Vlastní

Pro získání vztahu pro Comptonův posun bude zákon zachování hybnosti zapsán za použití kosinové věty:

$$(mv)^2 = p_v^2 + p_{v'}^2 - 2p_v p_{v'} \cos \vartheta$$

Kde: $p_v = h\omega/c$ je hybnost fotonu před srážkou, $p_{v'} = h\omega'/c$ je fotonu po srážce, v je rychlost elektronu po srážce, ϑ je úhel, který svírá směr původní hybnosti p_v a směr hybnosti $p_{v'}$. (Záškodný, 2005)

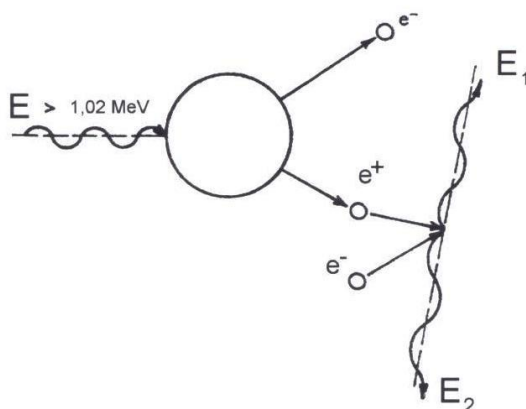
Po úpravách a vyloučení neznámé rychlosti v elektronu, získáme vztah pro Comptonův posun:

$$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \vartheta)$$

Teoreticky tento vztah platí pro libovolné hmotnosti fotonu. Pokud by však byla hmotnost mnohem menší, než je klidová hmotnost elektronu m_0 , nebude platit vztah pro Comptonův posun ani zákon zachování energie přesně, jelikož by ztráta hybnosti fotonu byla nepatrná a Comptonův posun by tak byl neměřitelně malý. Z tohoto důvodu lze pozorovat Comptonův jev jen pro fotony s velkou hmotností (nikoliv pro fotony viditelného světla). (Bailey et al., 2004; Horský, 1996; Záškodný, 2005)

1.4.3 Obrácený anihilační jev

Vznik dvojice elektron-pozitron lze pozorovat u gama záření s energií vyšší než 1 MeV. Při tomto jevu proniká foton obvykle do velké blízkosti jádra atomu a při jeho zániku dojde ke vzniku elektron-pozitronového páru. (Sirdik, 2021; Záškodný, 2005)



Obr. 9: Tvorba elektron-pozitronových párů. Zdroj: <http://fbmi.sirdik.org/>

Dvojice elektron-pozitron má výslednou kinetickou energii, která je dána vztahem:
 $T = h\omega - 2m_0c^2$. (Záškodný, 2005)

1.5 Veličiny a jednotky jaderného záření

a) Aktivita A radioaktivního zdroje

Aktivita radioaktivního zářiče je definována jako počet radioaktivních přeměn vztažených na jednotku času (pro dlouhodobé zářiče). Obecněji jde o součin rozpadové konstanty λ a počtu radioaktivních jader mateřského prvku n .

$$A = -dn/dt = \lambda n$$

Jednotkou aktivity je becquerel (Bq). 1 Bq odpovídá přeměně radioaktivního jádra za jednu sekundu. (Kubinyi et al., 2018; Záškodný, 2005)

b) Intenzita I jaderného záření

Jedná se o energii záření, která je vysílána do plochy kolmo ke směru postupu záření za jednu sekundu. Jednotkou intenzity I je $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Měrnou ztrátu intenzity záření můžeme vyjádřit jako poměr intenzity záření I v dané tloušťce prostředí pod jeho povrchem k počáteční intenzitě I_{max} na povrchu prostředí. (Záškodný, 2005)

Intenzita je definována vztahem:

$$I = G A / 4\pi r^2$$

Radioaktivní prvek vysílá záření do všech směrů, a to izotropně do plného prostorového úhlu 4π . S rostoucí vzdáleností r od zdroje záření se intenzita zmenšuje. $4\pi r^2$ je plocha, ve které se distribuuje záření. Z vztahu pro intenzitu je patrné,

že intenzita záření je přímo úměrná aktivitě A a nepřímo úměrná druhé mocnině vzdálenosti od zdroje r . Koeficient G určuje počet kvant, které jsou emitovány při jedné radioaktivní přeměně radioaktivním zářičem. (Kubinyi et al., 2018)

c) Pohlcená dávka D , expozice (ozáření) X

Pohlcená (absorbovaná) dávka D je podíl střední sdělené energie $d\varepsilon$, která je předána prostřednictvím ionizujícího záření látce o hmotnosti dm . Pohlcená dávka D je dána vztahem:

$$D = d\varepsilon/dm$$

Jednotkou dávky je Gy (Gray), $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J.Kg}^{-1}$. (Kubinyi et al., 2018; Záškodný, 2005)

Expozice X je definována jen pro vzduch a je dána vztahem:

$$X = dQ/dm$$

Kde: dQ je absolutní hodnotou elektrického náboje iontů, které vznikly při úplném zabrzdění všech elektronů a pozitronů, které byly uvolněny fotony v objemu (vzduchu) o hmotnosti dm . Jednotkou expozice je C.kg^{-1} , dřívější jednotkou byl 1R ($1 \text{ R} = 0,258 \text{ mC.kg}^{-1}$). (Kubinyi et al., 2018; Sirdik, 2021)

d) Dávkový ekvivalent H

Dávkový ekvivalent určuje míru biologických účinků, které způsobuje jaderné záření. Závisí nejen na pohlcené dávce D , ale také na takzvaném jakostním činiteli Q , který nám udává rozdílnou biologickou účinnost různých druhů ionizujícího záření. Vztah pro dávkový ekvivalent H je následující (Ullmann, 2021):

$$H = Q.D$$

Jednotkou dávkového ekvivalentu je sievert (Sv), rozměr jednotky je J.kg^{-1} . Pro biologické účinky se mimo jiné taky používá jednotka rem (roentgen equivalent man), kterou lze vyjádřit jako dávku libovolného záření, která vyvolá u člověka stejný účinek jako 1 R rentgenového nebo gamma záření. Například pro gama a beta záření je $1 \text{ rep} = 1 \text{ rem}$, ale pro protony a rychlé neutrony je $1 \text{ rep} = 10\text{-}20 \text{ rem}$. (Sirdik, 2021; Záškodný, 2005)

e) Účinný průřez σ interakce

Takzvaný účinný průřez interakce je geometrický způsob, který názorně vyjadřuje pravděpodobnost interakcí částic. Obvykle je určen vztahem pro volné atomy prostředí (tedy pro atomy, které spolu interagují při srážkách jen jako tuhé koule) (Ullmann, 2021):

$$\sigma = \pi r_j^2$$

Kde: kde r_j je poloměr jádra atomu prostředí a veličina πr_j^2 představuje geometrický průřez jádra. Pro přitahující se částice prostředí je $\sigma > \pi r_j^2$, pro odpuzující se částice prostředí je $\sigma < \pi r_j^2$. V soustavě SI je jednotkou účinného průřezu m^2 , tato jednotka je však neadekvátně velká, proto se využívá jednotka barn (bn) definovaná $1 \text{ bn} = 10^{-28} \text{ m}^2$, která má řádově velikost geometrického průřezu atomového jádra. Účinný průřez σ je schopen vyjádřit pravděpodobnost, že u ostřelující částice dojde k interakci s jádry atomů prostředí. Ze vztahu vyplývá, že čím větší bude poloměr ostřelujícího tělesa, tím větší bude pravděpodobnost interakce. (Kubinyi et al., 2018; Záškodný, 2005)

f) Dolet D látkové částice jaderného záření

Ionizující záření při průchodu absorbuje látkou ztrácí svoji energii. Množství a způsob ztráty energie závisí na druhu ionizujícího záření a na fyzikálních vlastnostech absorbuje prostředí. Doletem D se rozumí délka dráhy, na které dojde během interakce s prostředím právě ke ztrátě počáteční kinetické energie a zastavení látkové částice. (Kubinyi et al., 2018; Záškodný, 2005)

Například u alfa částic, které nesou velký elektrický náboj, dochází k velkým ztrátám energie při průchodu absorbuje prostředím. Ztráta kinetické energie $-dT$, kterou alfa částice ztratila na dráze dx , je jen okamžitá kinetická energie T při vztažení na jednotkovou dráhu v daném prostředí funkcí $f(T)$. Křivka, která vyjadřuje závislost: $dT/dx = f(T)$ tzv. Braggova křivka je uvedena v kapitole 1.4. Je-li počáteční kinetická energie alfa částic označena T_α , lze dolet alfa částice vypočítat následovně:

$$D = \int_0^D dx = \int_0^{T_\alpha} \frac{dT}{f(T)}$$

Ve vzduchu je dolet D alfa částice řádově v centimetrech, ve tkáni mikrometry. Pro beta částice jsou dolety v tkáních řádově milimetry. (Záškodný, 2005)

1.6 Radionuklidová diagnostika

Radionuklidy jsou nezbytnou součástí diagnostických postupů v nukleární medicíně. V kombinaci se zobrazovacími technologiemi, která je schopna detekovat ionizující záření, je možné sledovat patologické děje téměř kdekoli v lidském organismu. (World nuclear..., 2020)

Jak bylo již v úvodu zmíněno, zobrazovací metodou nukleární medicíny je tzv. scintigrafie. Tento název je odvozen od scintilačního detektoru, který detekuje záření vycházející z těla vyšetřovaného pacienta, jemuž byl podán radionuklid ve formě tzv. radiofarmaka. Absorpce záření v detektoru vyvolá světelné záblesky (scintilace), které jsou následně elektronicky zpracovány a vyhodnocovány. Výsledný snímek zobrazí, jak se radiofarmakum distribuuje v organismu vyšetřovaného. (Kupka et al., c2007)

Scintigrafii můžeme rozdělit na statickou, kdy se sleduje rozložení radiofarmaka ve tkáni, a na dynamickou, kde se zachycuje změna radiofarmaka v čase. Dynamickou cestou tak lze posoudit funkce vyšetřovaného orgánu (např. transport jícnem, vylučování ledvinami, aj.). (Zobrazovací metody..., 2020)

Jelikož je záření emitováno právě ze zdroje uvnitř organismu, patří tomografické zobrazení v nukleární medicíně mezi zobrazení emisní. Emisní tomografii lze dále dělit na jednofotonovou SPECT (Single-Photon Computed Emission Tomography), kdy se zaznamenává prostorová distribuce radiofarmaka, který vysílá vždy jeden foton gama. SPECT slouží jako tomografická varianta k planární scintigrafii. K emisní tomografii je dále řazena pozitronová emisní tomografie PET (positron emission tomography), ve které se detekují anihilační fotony vznikající při interakci (anihilaci) pozitronu s elektronem v těle pacienta. Pro toto zobrazení se podávají radionuklidy emitující pozitrony. V současnosti je PET nejlepší metodou pro zobrazení funkčních dějů v organismu. Dnes se také používají kombinované (hybridní) přístroje, které kromě SPECT a PET kamery obsahují navíc CT (SPECT/CT a PET/CT). Tato kombinace dodává podrobnější informaci o uložení patologického ložiska zobrazeného pomocí scintigrafie. (Badawi, 2001; Šabata, 2009)

Radionuklidová diagnostika je stále se rozvíjejícím oborem, vznikají další radiofarmaka a zlepšují se možnosti přístrojové techniky, díky tomu je spektrum klinických aplikací čím dál tím obsáhlejší. Patří sem diagnostika v nukleární kardiologii

(perfuze myokardu, flebografie), diagnostika trávicího systému (jícen – např. hodnocení gastroezofageálního refluxu), vyšetření plic (perfuze a ventilace plic v diagnostice plicní embolie), vyšetření ledvin (posouzení funkce ledvin – vylučování, reflux, aj.), vyšetření endokrinního systému (nejčastěji štítná žláza a příštítná tělíska), scintigrafie skeletu (detekování kostních lézí), zánětlivé procesy, vyšetření nervového systému (perfuze mozku) a také onkologická diagnostika (dnes dominuje hlavně PET, ve vybraných indikacích i SPECT/CT). (Zobrazovací metody...,2020)

1.7 Radionuklidová terapie

Terapie pomocí otevřených zářičů slouží pro ozáření nádorové či jiné tkáně za účelem poškození až úplné destrukce cílového objemu. Předpokladem je, že budou okolní struktury ovlivněny léčbou minimálně. V současnosti se využívá především záření β^- , kdy se může jednat o čisté β^- zářiče (například ^{90}Y) nebo smíšené zářiče β^- , γ (např. ^{131}I). Otevřené zářiče α se zatím v terapii neuplatňují, ale v posledních letech probíhají studie zaměřené právě na tyto zářiče – je u nich očekávána větší léčebná účinnost. (Kupka et al., c2007; Zobrazovací metody...,2020) **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

Mezi nejčastější indikace léčby pomocí otevřených zářičů patří pacienti s nemocemi štítné žlázy, kde se využívá ^{131}I , který je fyziologicky vychytáván normální tyreoidální tkání (schopnost akumulovat jód mají i diferencované karcinomy). Využívá se především pro léčbu hyperfunkce štítné žlázy a diferencovaných karcinomů štítné žlázy. (Kupka et al., c2007)

Pro paliativní léčbu kostních metastáz, kde je hlavním cílem zmírnit bolest doprovázející onemocnění, se využívají osteotropní radiofarmaka, emitující záření β^- (například ^{89}Sr – konkrétně $^{89}\text{SrCl}$). Analgetický efekt je způsoben lokálním ozářením metastatických buněk, okolních kostních struktur a nervových zakončení. (Kupka et al., c2007)

Dalším příkladem z mnoha druhů terapií pomocí radionuklidů je léčba zvaná synoviortéza, která se provádí u pacientů s revmatickými nebo degenerativními onemocněními kloubů. Metoda je založena na intraartikulární aplikaci radiofarmaka. Příkladem je ^{90}Y , který se využívá pro onemocnění postihující kolenní kloub. Redukuje

se tak bolest a zmírňují se zánětlivé projevy (např. výpotek, otoky). (Kupka et al., c2007)

2. Hypotézy, cíle a metodika výzkum

2.1 Hypotézy a cíle

Bakalářská práce pracuje s dvěma hypotézami:

1. Aplikací teorie kurikulárního procesu lze vytvořit edukační text pro studenty oboru "Radiologický asistent" a dalších příbuzných oborů.
2. Znalosti respondentů o zdrojích a interakcích ionizujícího záření v nukleární medicíně budou mít rozdělení blízké rozdělení normálnímu

Práce se snaží naplnit následující cíle:

1. Výběr teorie přenosu poznatků na úroveň radiologického asistenta a dalších příbuzných oborů.
2. Na základě teorie kurikulárního procesu zpracovat strukturu fyzikálních základů nukleární medicíny ve formě edukačního textu, který bude respektovat vybranou teorii.
3. Experimentální ověření edukačního textu dotazníkovým testem znalostí respondentů bez aplikace robustní analýzy
4. Experimentální ověření edukačního textu dotazníkovým testem znalostí respondentů s aplikací robustní analýzy

2.2 Metodika výzkumu

1. Analýza současného vědeckého systému s cílem aplikovat kurikulární proces.
2. Vytvoření vlastního edukačního textu na základě analýzy současného vědeckého systému v oblasti nukleární medicíny.
3. Zprostředkování edukačního textu vybranému souboru respondentů.
4. Zprostředkování edukačního testu vytvořeného na podkladě edukačního textu pro ověření znalostí vybraného souboru respondentů a následné statistické zpracování těchto testů.

Při analýze současných studijních materiálů v oblasti radionuklidové diagnostiky a terapie nebyl k dispozici edukační text pro studenty oboru „Radiologický asistent“ nebo obdobných oborů. Proto bude vytvořen text vlastní, který bude respektovat

vybranou teorií. Jeho srozumitelnost bude experimentálně ověřena v podobě edukačního testu u vybraného souboru respondentů. Pro přenos edukačních poznatků adresátům byl aplikován kurikulární proces fyziky v podobě následujících forem (Záškodný, 2015; Záškodný, 2021a; Záškodný, 2021b):

- **Konceptuální kurikulum**

Jedná se o koncepci toho, co má být ve školách obsahem vzdělávání. Pro úplné pochopení problematiky radionuklidové diagnostiky a terapie je nutno znát základní principy radionuklidové diagnostiky a terapie, interpretaci rozpadového a absorpčního zákona, druhy záření a interakce ionizujícího záření s prostředím.

- **Zamýšlené kurikulum**

Zde jsou poznatky přizpůsobovány tak, aby byly úměrné znalostem adresátů, v tomto případě znalostem studentům oboru „Radiologický asistent“ a dalších příbuzných oborů, které získali během studia na střední a vysoké škole.

- **Projektové kurikulum**

Na základě analýzy současného vědeckého systému je obsah fyziky promítnutý do učebního textu „Fyzikální podstata radionuklidové diagnostiky a terapie“, který je přiměřený úrovni znalostí adresátů. Právě edukační text této bakalářské práce je důležitou součástí projektového kurikula.

- **Implementované kurikulum 1,2**

Obsah vzdělávání obsažený v projektovém kurikulu, zde edukační text, by byl prezentován adresátům edukace. Následně by mělo proběhnout ověření edukační funkce vzniklého textu. V praxi by tento proces mohl probíhat následovně: Jako náplní projektového kurikula by byl vytvořen již zmíněný edukační text. Byl by osloven vybraný soubor adresátů, kteří by byli požádáni o prostudování studijních materiálů. Na seznámení se s textem by byl určen takový časový interval, který by nejlépe vyhovoval časovým možnostem adresátů. Pro ověření efektivity edukačního textu by byl následně aplikován znalostní test.

- **Dosažené kurikulum**

Aplikovatelné výsledky obsahu výuky, které by byly použitelné v praktickém životě nebo v navazujícím vědeckém výzkumu, nebyly zkoumány a nebyly obsaženy v cílech práce.

(Záškodný, 2015; Záškodný, 2021a; Záškodný, 2021b)

2.3 Statistické vyhodnocení

Statistické metody, které jsou použity ve výzkumné části této bakalářské práce, slouží pro potvrzení nebo naopak vyvrácení stanovených hypotéz a vyhodnotí, zda byly cíle bakalářské práce naplněny zcela, částečně nebo vůbec. Následně jsou uvedeny vybrané statistické metody, které byly použity ve výzkumné části. (Záškodný et al, 2016)

- **Formulace statistického šetření**
- **Škálování**
- **Měření**
- **Elementární statistické zpracování**

2.3.1 Formulace statistického šetření

Následující pojmy jsou základem pro formulaci statistického šetření (Záškodný et al, 2016):

- Hromadný náhodný jev (HNJ)
- Statistická jednotka (SJ)
- Statistický znak (SZ)
- Hodnoty statistického znaku (HSZ)
- Základní statistický soubor a jeho rozsah (ZSS)
- Náhodný výběr (NV)
- Výběrový statistický soubor a jeho rozsah (VSS)

Hromadný náhodný jev můžeme charakterizovat jako společnou vlastnost, kterou zkoumáme u všech statistických jednotek statistického souboru. Takovým hromadným náhodným jevem může být například analýza znalostí adresátů v oblasti radionuklidové diagnostiky a terapie formou edukačního testu.

Statistickou jednotkou je právě prvek zkoumaného statistického souboru, který má určité vlastnosti stejné jako zbytek zkoumaného souboru. Například v této práci je statistickou jednotkou jedinec podrobující se znalostnímu testu.

Statistický znak definuje vlastnost, která je odlišná od ostatních zkoumaných prvků. Zde je statistickým znakem například rozsah znalostí v oblasti radionuklidové diagnostiky a terapie.

Hodnota statistického znaku je způsob, kterým se popisuje sledovaný statistický znak pomocí naměřených hodnot nebo pomocí prvků škály. V bakalářské práci budou takto hodnoceny znalosti adresátů edukace prostřednictvím dosažených bodů ve znalostním testu.

Základní statistický soubor je dán počtem všech statistických jednotek.

Náhodný výběr je proces, při kterém se redukuje počet sledovaných statistických jednotek za účelem přenesení získaných výsledků na základní statistický soubor. Může se uskutečnit pomocí losování, generování tabulkou náhodných čísel apod. V této práci nebylo potřeba uskutečnit náhodný výběr.

Výběrový statistický soubor je soubor statistických jednotek, který vznikl po aplikaci náhodného výběru. Výsledný rozsah je roven vybranému počtu statistických jednotek.

(Záškodný et al, 2016)

2.3.2 Škálování

Abychom mohli vyjádřit hodnoty statistického znaku, je zapotřebí zavést prvky škály, které seskupí hodnoty zkoumaného statistického znaku do skupin. Tento proces se nazývá škálování. Lze rozlišit dle povahy statistického znaku čtyři typy škál: nominální, ordinální, kvantitativní metrickou a absolutní metrickou. (Kozlovská et al., 2005)

Nominální škála nám umožňuje klasifikovat znaky dle toho, zda jsou totožné nebo rozdílné.

Ordinální škála poskytuje také možnost určení rozdílnosti nebo totožnosti statistických jednotek, na rozdíl od nominální škály dokáže stanovit i jejich pořadí. Nicméně nedokážeme zde stanovit vzdálenost mezi sousedními statistickými jednotkami, které byli uspořádány podle této škály.

Stanovení vzdálenosti umožňuje až **kvantitativní metrická škála**. Pro stanovení vzdálenosti je nezbytné definovat jednotku škály. Kvantitativní metrická škála vyjadřuje hodnoty bez možnosti stanovit počátek škály (nulový bod), proto je volba počátku libovolná. Pro tuto bakalářskou práci bude použita právě kvantitativní metrická škála.

Takzvaná **absolutní metrická škála** umožňuje navíc určení počátku škály a nezávisí na volbě jednotky škály (počet chybných bodů při testování, teplota ve stupních Celsia atd.).

(Záškodný et al, 2016; Zvárová 2016)

2.3.3 Měření

Měření lze definovat jako proces, při kterém je přiřazován jeden z k prvků škály x_i ke každé zkoumané statistické jednotce výběrového statistického souboru. Výsledkem měření je pak počet naměření prvků škály (n_i krát). Součet **absolutních četností**, tedy všech n_i hodnot, musí být roven celkovému počtu všech statistických jednotek n výběrového statistického souboru.

Výsledky měření lze hodnotit také pomocí pravděpodobnosti, se kterou při měření nastanou. Pravděpodobnost výsledku x_i je dána **relativní četností** n_i/n , jejichž součet musí být roven 1.

Pravděpodobnost, že bude naměřen výsledek menší nebo rovný výsledku x_i udává **kumulativní četnost** $\sum n_i/n$. Z tohoto důvodu můžeme kumulativní četnost používat pouze u kvantitativních nebo absolutních metrických škál.

(Záškodný et al, 2016)³¹

2.3.4 Elementární statistické zpracování

Úkolem elementárního statistického zpracování je po získání výsledků měření je uspořádat výsledky do škál, zapsat do tabulek a následně je vyjádřit a parametrizovat pomocí grafů a empirických parametrů. (Záškodný et al, 2016)

▪ Tabulka

Tabulka slouží pro uspořádání rozdílných hodnot výsledků měření. Tabulku tvoří osm sloupců, kde první polovina sloupců slouží pro zpřehlednění výsledných hodnot měření a pro znázornění empirických rozdělení. Zbylé čtyři sloupce slouží pro zjednodušení výpočtu empirických parametrů. Každý sloupec je zakončen součtem

hodnot, které se v nich nacházejí. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** (Záškodný et al, 2016)

První čtyři sloupce tabulky obsahují (Záškodný et al, 2016):

- sloupec označený x_i prvky škály
- sloupec označený n_i absolutní četnosti prvků škály
- sloupec označený n_i/n relativní četnosti prvků škály
- sloupec označený $\sum n_i/n$ kumulativní četnosti.

Zbývající čtyři sloupce (Záškodný et al, 2016):

- sloupec obsahuje součiny $x_i n_i$
- sloupec obsahuje součiny $x_i^2 n_i$
- sloupec obsahuje součiny $x_i^3 n_i$
- sloupec obsahuje součiny $x_i^4 n_i$

▪ Grafické znázornění

Grafické znázornění empirického rozdělení využívá souřadnicového systému v rovině x a y , kde na vodorovné ose x jsou nanášeny hodnoty znaku x_i a na svislou osu y hodnoty odpovídající četnosti. Spojením vynesných sousedních bodů na osách x a y získáme lomenou čáru tzv. polygon. Rozeznáváme „polygon absolutních četností“, „polygon relativních četností“ a „polygon kumulativních četností“. Mimo polygon četností lze také pro statistické šetření využívat histogram četností nebo například kruhový diagram. (Záškodný et al, 2016; Zvárová 2016) **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

▪ Empirické parametry

Empirické parametry vyjadřují povahu sledovaného statistického souboru. Jsou děleny dle vystihované vlastnosti zkoumaného statistického souboru:

→ Parametr polohy

Aritmetický průměr všech hodnot ve statistickém souboru. Je určen obecným momentem 1. řádu O_1 . Určuje polohu empirického rozdělení četností na vodorovné ose x souřadnicového systému.

$$O_1(x) = \frac{1}{n} \sum n_i x_i$$

→ Parametr proměnlivosti

Empirický rozptyl. Je určen centrálním momentem 2. řádu C_2 . Druhá odmocnina rozptylu se nazývá „směrodatná odchylka“ a ta definuje výpovědní hodnotu aritmetického průměru.

$$C_2(x) = \frac{1}{n} \sum n_i (x_i - \bar{x})^2$$

$$S_x = \sqrt{C_2}$$

→ Parametr šikmosti

Koeficient šikmosti. Nejčastěji je určován pomocí normovaného momentu 3. řádu N_3 . Udává míru četnosti prvků škály v závislosti na hodnotě koeficientu.

$$N_3 = \frac{C_3}{C_2 \sqrt{C_2}}$$

Kde C_3 je centrálním momentem třetího řádu:

$$C_3(x) = \frac{1}{n} \sum n_i (x_i - \bar{x})^3$$

→ Parametr špičatosti

Koeficient špičatosti. Je nejčastěji určován pomocí normovaného momentu 4. řádu N_4 . Určuje míru špičatosti rozdělení prvků škály.

$$N_4 = \frac{C_4}{C_2^2}$$

Kde C_4 je centrálním momentem čtvrtého řádu:

$$C_4(x) = \frac{1}{n} \sum n_i (x_i - \bar{x})^4$$

(Matematika...,2021; Záškodný et al, 2016; Záškodný 2013; Zvárová 2016)

2.4 Metody matematické statistiky

a) Neparametrické testování hypotéz

Neparametrické testování je nahrazení empirického rozdělení četností rozdělením teoretickým. Jedná se tedy o statistickou metodu, která nepředpokládá konkrétní rozdělení. Pro neparametrické testování se využívá aparát nulových a alternativních hypotéz na stanovené hladině významnosti, která se značí α . Mezi nejčastější hladiny významnosti patří hodnoty $\alpha = 0,05$ a $\alpha = 0,01$. Výsledkem neparametrického testování

je přijetí nebo zamítnutí nulové hypotézy a přijetí nebo zamítnutí alternativní hypotézy. (Záškodný et al, 2016; Zvárová 2016)

Podmínkou pro ověření hypotéz je volba testového kritéria, v této bakalářské práci bude zvolen χ^2 -test dobré shody.

$$\chi_{exp}^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}, p_i = F(u_i) - F(u_{i-1}) \wedge u_i = \frac{u_i - \mu}{\sigma}$$

Pro jeho použití je nutno vytvořit intervalové rozdělení četností, proto je vhodné, aby u každého prvku škály bylo minimálně 5 výsledků testů. Pokud by byla četnost nižší (<5), bylo by zapotřebí dílčí intervaly spojit. Za těchto podmínek se musí následně určit experimentální hodnota zvoleného kritéria a kritické teoretické hodnoty, prostřednictvím které bude zapsán kritický obor příslušného kritéria. (Záškodný 2013)

Následně se musí posoudit, zda je experimentální hodnota prvkem kritického oboru. Za předpokladu, že je hodnota prvkem kritického oboru, je přijata alternativní hypotéza a znamená to, že empirické rozdělení nelze nahradit zamýšleným rozdělením teoretickým. Pokud by experimentální hodnota nebyla prvkem kritického oboru, je přijata nulová hypotéza, a tudíž empirické rozdělení lze nahradit teoretickým. (Záškodný et al, 2016)

b) Teorie odhadů

Navazující metodou matematické statistiky je teorie odhadů. Dosud bylo již identifikováno teoretické rozdělení a díky neparametrickému testování bylo přiřazené empirickému rozdělení četností. Nejsme však schopni definovat hodnoty teoretických parametrů. Pro interpretaci dosažených výsledků neparametrického testování je nutné nejdříve teoretické parametry odhadnout. Existují dva druhy odhadů teoretických parametrů: bodové a intervalové odhady. (Záškodný et al, 2016)

c) Parametrické testování hypotéz

U parametrického testování hypotéz se znovu využívá aparátu nulové hypotézy H_0 a alternativní hypotézy H_a , doplněné o aparát kritického oboru W , a to formou testů (např. u-test, t-test, f-test a χ^2 -test). Je zde předpokládáno, že empirickému rozdělení lze přiřadit normální rozdělení. Parametrické testování dělíme na jednovýběrové (o střední hodnotě nebo o rozptylu) a dvojevýběrové testování (o rovnosti středních hodnot nebo rozptylů). (Záškodný et al, 2016)

d) Měření statistických závislostí

Pro vícerozměrný výběrový statistický soubor je využívána metoda měření statistických závislostí, kde zkoumáme více statistických znaků souběžně. Mezi statistické závislosti můžeme řadit závislost regresní, která vyjadřuje charakter závislosti a závislosti korelační, která slouží k vyjádření síly (těsnosti) sledované závislosti. (Záškodný 2013; Zvárová 2016)

3. Výsledky

3.1 Statistické vyhodnocení dotazníku pro statistický soubor respondentů bez eliminace odlehlých dat (bez aplikace robustní analýzy)

Pro dosažení cílů výzkumu a ověření hypotéz této bakalářské práce budou výše uvedené statistické metody a postupy následně použity pro konkrétní statistické vyhodnocení. Tyto vybrané metody a postupy povedou k následujícím výsledkům. (Záškodný et al, 2016)

3.1.1 Formulace statistického šetření

- Hromadný náhodný jev – měření znalostí studentů oboru „Radiologický asistent“ bez aplikace robustní analýzy (není podstatné, zda respondent má pozitivní vazbu na zkoumání fyzikální podstaty radiologických jevů)
- Statistická jednotka – student oboru „Radiologický asistent“
- Statistický znak – rozsah znalostí v oblasti fyzikální podstaty radionuklidové diagnostiky a terapie
- Základní statistický soubor – 36 studentů
- Výběrový statistický soubor – 36 studentů

3.1.2 Škálování a měření

Pro tuto bakalářskou práci bylo využito kvantitativně metrické škálování, které umožňuje stanovení vzdálenosti mezi dvěma sousedními statistickými jednotkami. Bylo provedeno celkem 36 měření. Bylo možné získat maximálně 18 bodů, dosažené počty byly v intervalu <7;18>.

Prostřednictvím Sturgersova pravidla ($k = 1 + 3,3\log_{10}n$) bylo pro bodové ohodnocení vymezeno celkem 6 intervalů prvků škály: $(-\infty; 8 >$, $< 9; 10 >$, $< 11; 12 >$, $< 13; 14 >$, $< 15; 16 >$, $< 17; \infty$). Větší počet prvků škály byl použit s ohledem na možnost pozdějšího použití robustní analýzy. 31 2013)

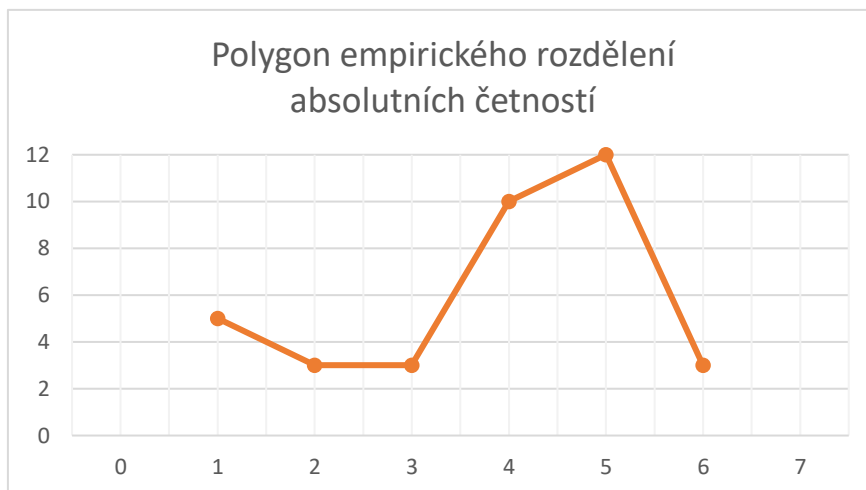
- | | |
|-----------------------------------|-------------|
| 1. prvek škály (méně než 8 bodů) | 5 studentů |
| 2. prvek škály (9-10 bodů) | 3 studenti |
| 3. prvek škály (11-12 bodů) | 3 studenti |
| 4. prvek škály (13-14 bodů) | 10 studentů |
| 5. prvek škály (15-16 bodů) | 12 studentů |
| 6. prvek škály (více než 17 bodů) | 3 studenti |

3.1.3 Elementární statistické zpracování

Tabulka 10: Elementární statistické zpracování

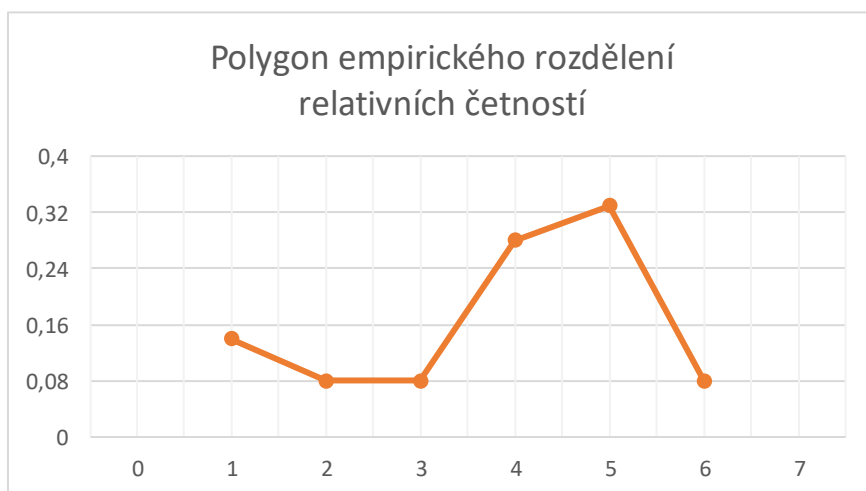
	$x_i (a;b)$	Stř. int.	n_i	$\sum n_i$	n_i/n	$\sum n_i/n$	$x_i n_i$	$x_i^2 n_i$	$x_i^3 n_i$	$x_i^4 n_i$
1	$(-\infty; 8 >$	7,5	5	5	0,14	0,14	37,5	281,25	2109,38	15820,31
2	$< 9; 10 >$	9,5	3	8	0,08	0,22	28,5	270,75	2572,13	24435,19
3	$< 11; 12 >$	11,5	3	11	0,08	0,31	34,5	396,75	4562,63	52470,19
4	$< 13; 14 >$	13,5	10	21	0,28	0,58	135	1822,5	24603,75	332150,63
5	$< 15; 16 >$	15,5	12	33	0,33	0,91	186	2883	44686,5	692640,75
6	$< 17; \infty)$	17,5	3	36	0,08	1	52,5	918,75	16078,13	281367,19
\sum			36		1		474	6573	94612,52	1398884,26

Zdroj: Vlastní výzkum



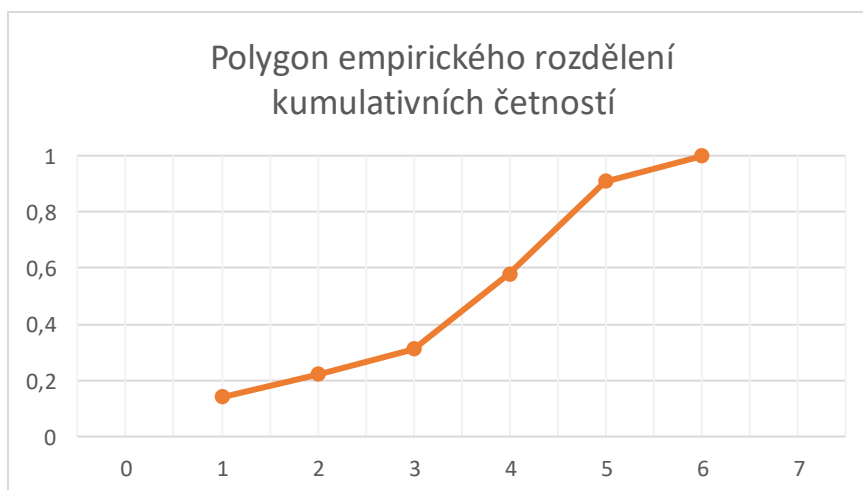
Obrázek 11: Polygon empirického rozdělení absolutních četností

Zdroj: Vlastní výzkum



Obrázek 12: Polygon empirického rozdělení relativních četností

Zdroj: Vlastní výzkum



Obrázek 13: Polygon empirického rozdělení kumulativních četností

Zdroj: Vlastní výzkum

Empirické parametry:

- **Parametr polohy** (aritmetický průměr) se vypočítá pomocí následujícího vzorce:

$$O_1(x) = \frac{1}{n} \sum n_i x_i = \frac{474}{36} = 13,17$$

- **Parametr proměnlivosti (variability)** se vypočítá následovně:

$$O_2 = \frac{1}{n} \sum n_i x_i^2 = \frac{6573}{36} = 182,58$$

$$C_2(x) = \frac{1}{n} \sum n_i (x_i - O_1)^2 = O_2 - O_1^2 = 182,58 - 173,44 = 9,14$$

Následující výpočet **směrodatné odchylky** slouží pro získání výpovědní hodnoty aritmetického průměru:

$$s_x = \sqrt{C_2} = 3,02$$

Pokud by byla směrodatná odchylka velká, znamená to, že výpovědní hodnota aritmetického průměru je malá a opačně.

- **Parametr šikmosti** lze vypočítat za použití následujícího vzorce:

$$O_3 = \frac{1}{n} \sum n_i x_i^3 = \frac{94612,52}{36} = 2628,13$$

$$C_3(x) = \frac{1}{n} \sum n_i (x_i - O_1)^3 = O_3 - 3O_2O_1 + 2O_1^3$$

$$= 2628,13 - 3 \times 182,58 \times 13,17 + 2 \times 2284,32$$

$$= -16,97$$

$$N_3 = \frac{C_3}{C_2 \sqrt{C_2}} = \frac{-16,97}{9,14 \sqrt{9,14}} = -0,61$$

Výsledný parametr šikmosti je záporný, což znamená, že prvky ležící vpravo od aritmetického průměru mají vyšší četnosti.

- **Parametr špičatosti** se vypočítá následovně:

$$O_4 = \frac{1}{n} \sum n_i x_i^4 = \frac{1398884,26}{36} = 38875,9$$

$$C_4(x) = \frac{1}{n} \sum n_i (x_i - O_1)^4 = O_4 - 4O_3O_1 + 6O_2O_1^2 - 3O_1^4$$

$$= 38875,9 - 4 \times 2628,13 \times 13,17 + 6 \times 182,58 \times 173,44 + 3 \times 30084,52$$

$$= 38875,9 - 138449,89 + 190000,05 - 90253,56 = 172,5$$

$$N_4 = \frac{C_4}{C_2^2} = \frac{172,5}{83,54} = 2,06$$

Veličina „exces“ se také používá pro srovnání špičatosti empirického rozdělení se špičatostí rozdělení normálního:

$$E_x = N_4 - 3 = -0,94$$

Pokud je exces kladný, empirické rozdělení je špičatější než rozdělení normální.
(Záškodný et al, 2016)

3.1.4 *Neparametrické testování – Pearsonův test χ^2*

Cílem neparametrického testování je zjištění, zda empirické rozdělení relativních četností lze nahradit rozdělením normálním. Pro neparametrické testování bude využit χ^2 test dobré shody jako test normality. (Dorda, 2013; Záškodný et al, 2016)

Abychom mohli specifikovat nulovou a alternativní hypotézu, je nutno nejprve odhadnout neznámý parametr exponenciálního rozdělení μ na základě výběru (Dorda, 2013):

$$\check{\mu} = \frac{1}{\bar{x}} = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n n_i z_i} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n n_i z_i} = \frac{36}{5 \times 7,5 + \dots + 3 \times 17,5} = 0,08$$

Pro hypotézu H_0 pochází náhodný výběr z exponenciálního rozdělení s parametrem $\mu = 0,08$, a H_a náhodný výběr nepochází z exponenciálního rozdělení s parametrem $\mu = 0,08$.

Poté je zapotřebí před výpočtem teoretických relativních četností určit hodnoty distribuční funkce exponenciálního rozdělení pro všechny horní hranice h_i (Dorda, 2013)4:

$$F(h_1) = 1 - e^{-0,08 \times 8} = 0,473$$

$$F(h_2) = 1 - e^{-0,08 \times 10} = 0,551$$

$$F(h_3) = 1 - e^{-0,08 \times 12} = 0,617$$

$$F(h_4) = 1 - e^{-0,08 \times 14} = 0,674$$

$$F(h_5) = 1 - e^{-0,08 \times 16} = 0,722$$

$$F(h_6) = 1$$

Dále stanovíme relativní četnosti na základě hodnot distribuční funkce, které jsou následující 4:

$$p_{0,1} = F(h_1) = 0,473$$

$$p_{0,2} = F(h_2) - F(h_1) = 0,078$$

$$p_{0,3} = F(h_3) - F(h_2) = 0,066$$

$$p_{0,4} = F(h_4) - F(h_3) = 0,078$$

$$p_{0,5} = F(h_5) - F(h_4) = 0,048$$

$$p_{0,6} = F(h_6) - F(h_5) = 0,278$$

V následující tabulce je uveden přehled výpočtů Pearsonova testu χ^2 .

Tabulka 14: Výpočty Pearsonova χ^2 – testu dobré shody

x_i	Stř. int.	n_i	Hor. hranice h_i	Distribuční fce. $F(h_i)$	Teoretická rel. četnost $p_{0,i}$	Teoretická četnost np_i
$(-\infty; 8>$	7,5	5	8	0,473	0,473	17,03
$<9; 10>$	9,5	3	10	0,551	0,078	2,81
$<11; 12>$	11,5	3	12	0,617	0,066	2,38
$<13; 14>$	13,5	10	14	0,674	0,057	2,05
$<15; 16>$	15,5	12	16	0,722	0,048	1,73
$<17; \infty)$	17,5	3	∞	1	0,278	10
Σ		36			1	36

Zdroj: Vlastní výzkum

V tabulce je možné vidět teoretickou četnost <5 u 2. až 5. prvku škály, proto lze jejich intervaly sloučit v jeden. V dalším kroku bude vypočítána experimentální hodnota Pearsonova χ^2 – testu χ^2_{exp} pomocí vzorce (Dorda, 2013)4:

$$\chi_{\text{exp}}^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}$$

Tabulka 15: Výpočty Pearsonova χ^2 – testu χ^2_{exp}

n_i	Teoretická četnost np_i	Experimentální hodnota χ^2 testu
5	17,03	8,498
28	8,97	40,373
3	10	4,9
Σ	36	53,77

Zdroj: Vlastní výzkum

Dále lze získat teoretickou hodnotu Pearsonova χ^2 – testu:

$$\chi_{\text{teor}}^2 = \chi_{k-r-1}^2 = \chi_{3-1-1}^2 = \chi_1^2 = 3,84 \text{ pro } \alpha = 0,05$$

$$\text{tj. } \chi_{\text{exp}}^2 > \chi_{\text{teor}}^2$$

Nyní stanovíme pomocí kritické teoretické hodnoty kritický obor:

$$W = (\chi_1^2(0,05); \infty) = (3,84; \infty)$$

$$\chi_{\text{exp}}^2 \in W$$

Na základě výsledku Pearsonova testu dobré shody bylo zapotřebí přijmout alternativní hypotézu H_a . Na hladině statistické významnosti $\alpha = 0,05$ nelze bez aplikace robustní analýzy empirické rozdělení četnosti nahradit normálním rozdělením.

3.2 Statistické vyhodnocení dotazníku pro statistický soubor respondentů s eliminací odlehlých dat (s aplikací robustní analýzy)

Pro dosažení cílů výzkumu a ověření hypotéz této bakalářské práce budou výše uvedené statistické metody a postupy následně použity pro konkrétní statistické vyhodnocení. Tyto vybrané metody a postupy povedou k následujícím výsledkům. (Záškodný et al, 2016)

3.2.1 Formulace statistického šetření

- Hromadný náhodný jev – měření znalostí studentů oboru „Radiologický asistent“ s aplikací robustní analýzy (budou bráni v úvahu studenti s pravděpodobnou pozitivní vazbou na zkoumání fyzikální podstaty radiologických jevů)
- Statistická jednotka – student oboru „Radiologický asistent“
- Statistický znak – rozsah znalostí v oblasti fyzikální podstaty radionuklidové diagnostiky a terapie
- Základní statistický soubor – 31 studentů
- Výběrový statistický soubor – 31 studentů

3.2.2 Škálování a měření

Při aplikaci robustní analýzy bylo opět využito kvantitativně metrické škálování, které umožňuje stanovení vzdálenosti mezi dvěma sousedními statistickými jednotkami. Bylo provedeno celkem 36 měření, 5 měření pro výsledek „menší než 8 bodů“ bylo přiřazeno respondentům bez pozitivní vazby na zkoumání fyzikální podstaty radiologických jevů. Bylo možné získat maximálně 18 bodů, dosažené počty byly v intervalu $\langle 9; 18 \rangle$. Prostřednictvím Sturgersova pravidla ($k = 1 + 3,3 \log_{10} n$) bylo pro bodové ohodnocení použito celkem 5 intervalů prvků škály: ($\langle 9; 10 \rangle$, $\langle 11; 12 \rangle$, $\langle 13; 14 \rangle$, $\langle 15; 16 \rangle$, $\langle 17; \infty \rangle$). Větší počet prvků škály byl použit právě s ohledem na použití robustní analýzy. (Záškodný et al, 2016)

1. prvek škály (9-10 bodů)	3 studenti
2. prvek škály (11-12 bodů)	3 studenti
3. prvek škály (13-14 bodů)	10 studentů
4. prvek škály (15-16 bodů)	12 studentů
5. prvek škály (více než 17 bodů)	3 studenti

3.2.3 Elementární statistické zpracování s použitím robustní analýzy

Původní výsledek Pearsonova testu dobré shody zahrnuje i odlehlá data spojená s respondenty, kteří dosáhli méně než 9 bodů. V následujícím zpracování nebudou tyto data zahrnuta ve statistickém šetření. Tabulka č. 15 obsahuje data elementárního statistického zpracování bez odlehlých dat. Vzhledem k nízkému počtu respondentů u prvních dvou prvků škál budou tyto dvě hodnoty spojeny v jeden prvek škály (poslední prvek škály je spojen s respondenty s výraznou pozitivní vazbou na zkoumání fyzikální podstaty radiologických jevů).

Tabulka 16: Elementární statistické zpracování (bez odlehlých dat)

x_i	n_i	$\sum n_i$	n_i/n	$\sum n_i/n$	$x_i n_i$	$x_i^2 n_i$	$x_i^3 n_i$	$x_i^4 n_i$
1	6	6	0,19	0,19	6	6	6	6
2	10	16	0,32	0,51	29	40	80	160
3	12	28	0,39	0,9	36	108	324	972
4	3	31	0,1	1	12	48	192	768
\sum	31		1		74	202	602	1906

Zdroj: Vlastní výzkum

Pomocí již zmíněných vzorců pro výpočet parametrů a směrodatné odchylky získáme následující hodnoty: $O_1 = 2,4$, $O_2 = 6,52$, $C_2 = 0,76$ a $S_x = 0,9$.

3.2.4 *Neparametrické testování – Pearsonův test χ^2*

Laplaceova funkce F a její normovaná náhodná veličina u_i jsou dány vztahy (Záškodný et al, 2016):

$$F(u) = \int_{-\infty}^u \rho(u) du, \quad u_i = \frac{x_i - O_1}{S_x}$$

Za x_i jsou dosazovány hodnoty:

$$x_1 = 1,5, x_2 = 2,5, x_3 = 3,5, x_4 = \infty.$$

Hodnoty veličin u_i jsou pak následující:

$$u_1 = -0,1, u_2 = 0,11, u_3 = 1,21, u_4 = \infty.$$

Ze statistických tabulek tak lze získat hodnoty Laplaceových funkcí $F(u_i)$:

$$F(-0,1) = 0,16, F(0,11) = 0,54, F(1,21) = 0,89, F(\infty) = 1$$

Odtud plyne výpočet ploch p_i :

$$p_1 = 0,16, p_2 = 0,38, p_3 = 0,35, p_4 = 0,11.$$

Tabulka 17: Elementární statistické zpracování (bez odlehlých dat)

x_i	n_i	p_i	np_i	$\frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}$
1	6	0,16	4,96	0,22
2	10	0,38	11,78	0,27
3	12	0,35	10,85	0,12
4	3	0,11	3,41	0,06
Σ	31			0,67

Zdroj: Vlastní výzkum

Dále lze získat teoretickou hodnotu Pearsonova χ^2 – testu:

$$\chi_{\text{teor}}^2 = \chi_{k-r-1}^2 = \chi_{4-2-1}^2 = \chi_1^2 = 3,84 \text{ pro } \alpha = 0,05$$

$$\text{tj. } \chi_{\text{exp}}^2 < \chi_{\text{teor}}^2$$

Nyní stanovíme pomocí kritické teoretické hodnoty kritický obor:

$$W = (\chi_1^2(0,05); \infty) = (3,84; \infty)$$

$$\chi_{\text{exp}}^2 \notin W$$

Na základě výsledku Pearsonova testu dobré shody lze přijmout nulovou hypotézu H_0 – empirické rozdělení četností znalostí respondentů lze na základě eliminace odlehlých dat a na hladině statistické významnosti $\alpha = 0,05$ nahradit normálním rozdělením. Tento výsledek prokazuje z hlediska teorie kurikulárního procesu, že vypracovaný edukační text je přiměřený a odpovídá možnostem těch respondentů, kteří mají pozitivní vazbu na zkoumání fyzikální podstaty radiologických jevů.

4. Diskuse

4.1 Diskuse k ověření hypotéz a splnění cílů aplikovaného kvantitativního výzkumu

Bakalářská práce je zprávou o ověřování dvou hypotéz:

- **H1** Aplikací teorie kurikulárního procesu lze vytvořit edukační text pro studenty oboru "Radiologický asistent" a dalších příbuzných oborů.
- **H2** Znalosti respondentů o zdrojích a interakcích ionizujícího záření v nukleární medicíně budou mít rozdělení blízké rozdělení normálnímu

Vytvořením edukačního textu (viz 4.1.3) byla potvrzena hypotéza H1. Aplikací teorie kurikulárního procesu byl vytvořen edukační text odpovídající kritériu přiměřenosti a možnostem adresátů – radiologických asistentů

Bakalářská práce je zprávou o plnění následujících cílů:

- **C1** Výběr teorie přenosu poznatků na úroveň radiologického asistenta a dalších příbuzných oborů.
- **C2** Na základě teorie kurikulárního procesu zpracovat strukturu fyzikálních základů nukleární medicíny ve formě edukačního textu, který bude respektovat vybranou teorii.
- **C3** Experimentální ověření edukačního textu dotazníkovým testem znalostí respondentů bez aplikace robustní analýzy.

- **C4** Experimentální ověření edukačního textu dotazníkovým testem znalostí respondentů s aplikací robustní analýzy.

Vytvořením edukačního textu bylo potvrzeno splnění cílů C1, C2. Aplikací teorie kurikulárního procesu byl vytvořen edukační text respektující průnik výchozích teorií – fyziky a radiologie v oblasti přípravy radiologických asistentů.

4.2 Diskuse k výsledkům dotazníkového šetření

V této části diskuse bude prostřednictvím statistického zpracování dat získaných aplikací edukačního testu diskutováno ověřování hypotézy H2 a plnění cílů C3 a C4.

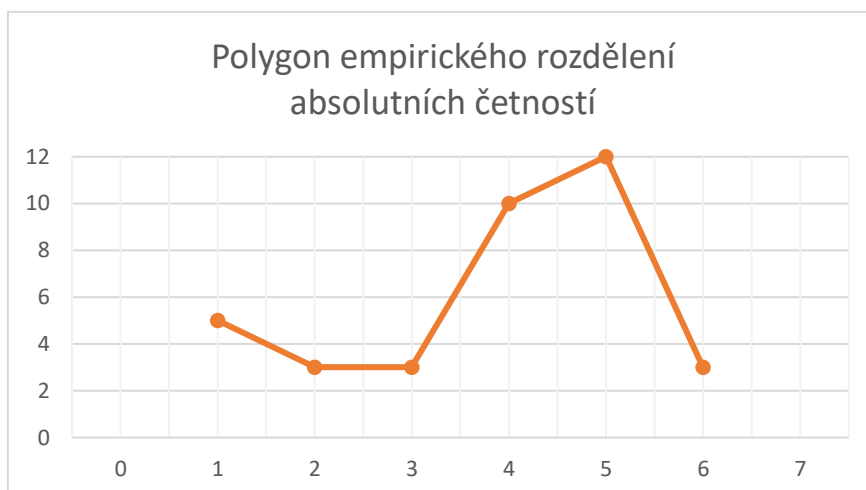
4.2.1 Dotazníkový test znalostí respondentů bez aplikace robustní analýzy

Ověřování hypotézy H2 pro soubor respondentů bez aplikace robustní analýzy bylo provedeno cestou matematické statistiky a cestou deskriptivní statistiky.

Cestou matematické statistiky bylo prostřednictvím exponenciální kritéria zjištěna experimentální hodnota χ^2 -testu dobré shody $\chi^2_{\text{exp}} = 53,77$. Teoretická hodnota (při jednom teoretickém parametru exponenciálního kritéria je $\chi^2_{\text{teor}} = 3,84$. Vzhledem k tomu, že experimentální hodnota je vyšší než hodnota teoretická je nutno přijmout statistickou alternativní hypotézu – bez aplikace robustní analýzy, která by eliminovala respondenty bez pozitivní vazby na zkoumání fyzikální podstaty složek profilu radiologického asistenta nelze empirické rozdělení četností nahradit rozdělením normálním.

Použitý edukační text není pro všechny respondenty (to je pro respondenty, u nichž není brán ohled na typ vazby ke zkoumání fyzikální podstaty složek profilu radiologického asistenta) dostatečně přiměřený a neodpovídá potřebám uvedených respondentů – fyzikální aplikace nejsou pro uplatnění těchto respondentů podstatné.

Cestou deskriptivní statistiky lze dospět k obdobnému závěru. Graf empirického rozdělení četností na reprodukováném Obrázku 11 je tvarově velmi vzdálen tvaru Gaussovy křivky.



Obrázek 11: Polygon empirického rozdělení absolutních četností

Zdroj: Vlastní výzkum

Deskriptivní statistika poskytuje také údaj, který popisuje zisk průměrného počtu bodů v rámci aplikovaného edukačního testu pro respondenty, u nichž není brán ohled na typ vazby ke zkoumání fyzikální podstaty složek profilu radiologického asistenta – dosažený počet odpovídá přibližně 13 bodům.

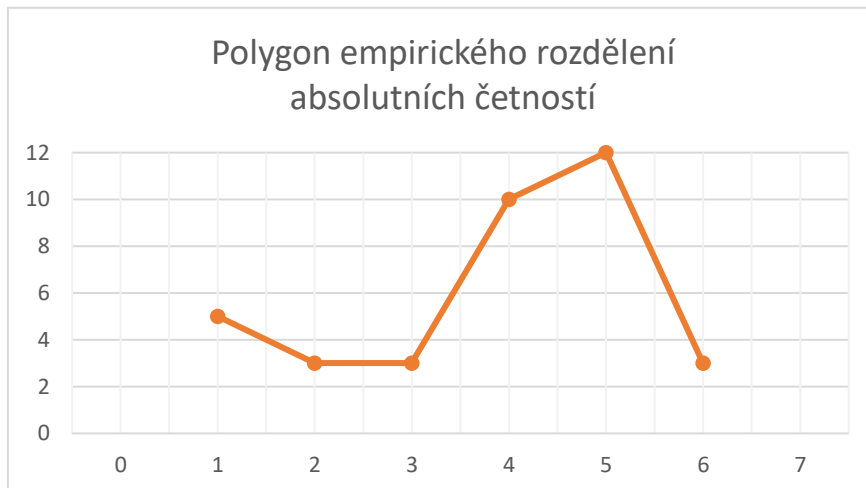
4.2.2 *Dotazníkový test znalostí respondentů s aplikací robustní analýzy*

Ověřování hypotézy H2 pro soubor respondentů s aplikací robustní analýzy bylo provedeno rovněž cestou matematické statistiky a cestou deskriptivní statistiky.

Cestou matematické statistiky bylo prostřednictvím obvyklého testu normality zjištěna experimentální hodnota χ^2 -testu dobré shody $\chi^2_{\text{exp}} = 0,67$. Teoretická hodnota (při dvou teoretických parametrech normálního rozdělení) je $\chi^2_{\text{teor}} = 3,84$. Vzhledem k tomu, že experimentální hodnota je nižší než hodnota teoretická je možné přijmout statistickou nulovou hypotézu – s aplikací robustní analýzy, která eliminuje respondenty bez pozitivní vazby na zkoumání fyzikální podstaty složek profilu radiologického asistenta lze empirické rozdělení četností nahradit rozdělením normálním.

Použitý edukační text je pro respondenty s pozitivní vazbou na zkoumání fyzikální podstaty složek profilu radiologického asistenta dostatečně přiměřený a odpovídá potřebám uvedených respondentů – fyzikální aplikace nejsou pro uplatnění těchto respondentů podstatné.

Cestou deskriptivní statistiky lze dospět k obdobnému závěru. Graf empirického rozdělení četností na reprodukováném Obrázku 11 je zapotřebí redukovat na tvar bez bodu o souřadnicích 1,5. Pak se tento tvar již velmi přibližuje tvaru Gaussovy křivky (zvláště při sloučení údajů spojených s body o souřadnicích 2,3 a 3,3).



Obrázek 11: Polygon empirického rozdělení absolutních četností

Zdroj: Vlastní výzkum

Deskriptivní statistika poskytuje také údaj, který popisuje zisk průměrného počtu bodů v rámci aplikovaného edukačního testu pro respondenty, u nichž je brán ohled na typ vazby ke zkoumání fyzikální podstaty složek profilu radiologického asistenta – dosažený počet stoupá přibližně k 15 bodům.

4.2.3 *Ověření hypotézy a splnění cílů aplikovaného kvantitativního výzkumu*

Hypotézu H2 lze považovat za potvrzenou pro respondenty, u nichž existuje pozitivní vazba na zkoumání fyzikální podstaty složek profilu radiologického asistenta. Pro tyto respondenty je vytvořený edukační text přiměřený a odpovídá jejich potřebám.

Hypotézu H2 je naopak zapotřebí zamítnout pro respondenty, u nichž absentuje pozitivní vazba na zkoumání fyzikální podstaty složek profilu radiologického asistenta. Pro tyto respondenty je vytvořený edukační text příliš náročný a neodpovídá jejich potřebě nezkoumat fyzikální podstaty složek profilu radiologického asistenta. Jedním z výsledků provedeného aplikovaného výzkumu je zjištění, že pro respondenty s absencí pozitivní vazby ke zkoumání fyzikální podstaty radiologických jevů by bylo vhodné vytvářet alternativní edukační text, který by transformoval vzorcovou podobu fyzikálních základů na podobu verbální

Cíle C3 a C4 výzkumu lze považovat za splněné. Experimentální cestou byla prověřena přiměřenost a potřebnost poznatků obsažených v edukačním textu pro obě popsané skupiny respondentů.

5. Závěr

V této bakalářské práci byla využita aplikace metod kurikulárního procesu a snaha zpracovat vědecké poznatky sdělitelným způsobem ve formě edukačního textu pro radiologické asistenty (viz příloha), který se zabýval fyzikální podstatou radionuklidové diagnostiky a terapie. Pro analýzu znalostí radiologických asistentů byl následně aplikován test, který vycházel z dané problematiky. Následné statistické šetření se zabývalo ověřením dvou hypotéz:

- **H1** Ověření, že aplikací teorie kurikulárního procesu lze vytvořit edukační text pro studenty oboru "Radiologický asistent" a dalších příbuzných oborů.
- **H2** Ověření, že znalosti respondentů o zdrojích a interakcích ionizujícího záření v nukleární medicíně budou mít rozdělení blízké rozdělení normálnímu.

Aplikací teorie kurikulárního procesu byl vytvořen edukační text odpovídající kritériu přiměřenosti a možnostem adresátů, čímž byla ověřena první hypotéza. Druhou hypotézu lze považovat za potvrzenou pro respondenty, u nichž existuje pozitivní vazba na zkoumání fyzikální podstaty složek profilu radiologického asistenta. Pro tyto respondenty byl edukační text přiměřený jejich možnostem. Naopak pro respondenty, u nichž je nedostatečná pozitivní vazba na zkoumání fyzikální podstaty složek profilu radiologického asistenta, je nutné druhou hypotézu zamítnout, neboť vzniklý edukační text je pro ně příliš náročný a neodpovídá jejich možnostem. Obě hypotézy byly ověřeny prostřednictvím metod neparametrického testování a deskriptivní statistiky.

Splnění cílů této bakalářské práce proběhlo následujícím způsobem:

Cíl 1: Výběr teorie přenosu poznatků na úroveň radiologického asistenta a dalších příbuzných oborů. **Cíl 2:** Na základě teorie kurikulárního procesu zpracovat strukturu fyzikálních základů nukleární medicíny ve formě edukačního textu, který bude respektovat vybranou teorii. Vytvořením edukačního textu bylo potvrzeno splnění cílů

C1 a C2. Prostřednictvím aplikace teorie kurikulárního procesu byl vytvořen edukační text respektující průnik výchozích teorií – fyziky a radiologie v oblasti přípravy radiologických asistentů.

Cíl 3: Experimentální ověření edukačního textu dotazníkovým testem znalostí respondentů bez aplikace robustní analýzy. **Cíl 4:** Experimentální ověření edukačního textu dotazníkovým testem znalostí respondentů s aplikací robustní analýzy. Cíle 3 a 4 lze považovat za splněné, experimentální cestou byla prověřena přiměřenost a potřebnost poznatků obsažených v edukačním textu pro obě popsané skupiny respondentů.

Na základě výsledků bakalářské práce lze říct, že bylo dosaženo teoretického přínosu teorie kurikulárního procesu, který byl promítnut na edukaci radiologických asistentů v oblasti fyzikální podstaty radionuklidové diagnostiky a terapie. Také bylo dosaženo praktických přínosů díky vytvoření edukačního textu a vyhodnocovacího testu, které by bylo možno následně využít v oblasti edukace radiologické fyziky pro vysokoškolský obor „radiologický asistent“ a případně dalším příbuzné obory.

Vzhledem k výskytu respondentů, pro které byl edukační text příliš náročný a pohybovali se mimo oblast normálního rozdělení, lze doporučit zkvalitnění studijní přípravy studentů v oblastech, kde bylo dosaženo slabších znalostí na podkladu dosažených výsledků edukačního testu. Také by bylo možno navrhnout navazující práci, zabývající se obdobnou tematikou jako například zmapování výhod a nevýhod radionuklidové diagnostiky oproti ostatním diagnostickým metodám.

6. Seznam literatury

1. BADAWI, Ramsey D, 2001. Nuclear medicine. Institute of Physics [online]. 2001 [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: doi:10.1088/0031-9120/36/6/302
2. BAILEY, D.L., J.L. HUMM a A. TODD-POKROPEK, 2014. Nuclear Medicine Physics: A Handbook for Teachers and Students [online]. Vienna [cit. 2021-04-10]. ISBN 978-92-0-143810-2. Dostupné z: <https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1617web-1294055.pdf>
3. BANÁŠ, Pavel, 2018. Fyzika IV. Olomouc: Prodos. ISBN 978-80-7230-390-8.
4. DORDA, M. Pearsonův χ^2 test dobré schody [PDF]. 2013 [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~dor028/KMORII_5.pdf
5. HORSKÝ, P., 1996. Univerzitní příprava gymnaziálních učitelů fyziky [online]. [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: <https://kof.zcu.cz/st/dp/horsky/html/2fotoel.html>. Diplomová práce. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity.
6. KOZLOVSKÁ, D. Z. FREITINGER SKALICKÁ a P. ZÁŠKODNÝ. Úvod do praktika z radiologické fyziky. České Budějovice: ZSF JU, 2005. ISBN 80-7040-797-2.
7. KUBINYI, Jozef, Jozef SABOL a Andrej VONDRÁK, 2018. Principy radiační ochrany v nukleární medicíně a dalších oblastech práce s otevřenými radioaktivními látkami. Praha: Grada Publishing. ISBN 978-80-271-0168-9.
8. KUPKA, Karel, Jozef KUBINYI a Martin ŠÁMAL. Nukleární medicína: [učební text]. [Praha]: P3K, c2007. ISBN 978-80-903584-9-2.
9. LEPEJ, Ján a Anton LACKO, 2018. Nukleárna medicína. Košice: EQUILIBRIA. ISBN 978-80-8143-222-4.
10. MAŇÁK, Josef, JANÍK, Tomáš a ŠVEC, Vlastimil. Kurikulum v současné škole. Brno: Paido, 2008. ISBN 978-80-7315-175-1.
11. MANDAL, Ananya, 2019. History of Nuclear Medicine [online]. [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://www.news-medical.net/health/History-of-Nuclear-Medicine.aspx>

12. Matematika polopatě — pro základní, střední a vysoké školy. Základy statistiky — Matematika polopatě [online]. 2021 [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <http://www.matematika.cz/zaklady-statistiky>
13. Metodický portál inspirace a zkušenosti učitelů. Kurikulum. [online]. 2011 [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: http://wiki.rvp.cz/Knihovna/1.Pedagogicky_lexikon/K/Kurikulum
14. NAVRÁTIL, Leoš a Jozef ROSINA, 2019. Medicínská biofyzika. 2., zcela přepracované a doplněné vydání. Praha: Grada Publishing. ISBN 978-80-271-0209-9.
15. PODZIMEK, František, 2013. Radiologická fyzika: fyzika ionizujícího záření. V Praze: České vysoké učení technické. ISBN 9788001053195.
16. Přírodní radioaktivita a problematika radonu [online], 2021. SÚRO, v.v.i [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/prirodnioz>
17. REICHL, J. a M. VŠETIČKA. Multimediální encyklopedie fyziky [online]. [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/807-aktivita-zarice-a-rozpadovy-zakon>
18. SEIDL, Zdeněk, 2012. Radiologie pro studium i praxi. Praha: Grada. ISBN 978-80-247-4108-6.
19. SIRDIK, Radiobiologie. [online]. 2021 [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/13/133.html>
20. ŠABATA, Ladislav, 2019. Nukleární medicína - technické základy: přístrojová a výpočetní technika v nukleární medicíně, základy radiofarmak a specifika radiační ochrany v nukleární medicíně. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zdravotně sociální fakulta. ISBN 9788073947347.
21. TREFIL, James, 2021. Atom. In: Encyclopædia Britannica [online]. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/atom>
22. ULLMANN, V. "AstroNuklFyzika" - jaderná fyzika, astrofyzika, kosmologie, filosofie. Jaderná a radiační fyzika [online]. [cit. 2021-02-01]. Dostupné z: <https://astronuklfyzika.cz/>
23. WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2020. Radioisotopes in Medicine [online]. [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: <https://www.world->

nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/radioisotopes-research/radioisotopes-in-medicine.aspx

24. ZÁŠKODNÝ, Přemysl, 2021a. Algorithm of Problem Solving in Educational Data Mining Approach. Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics [online]. 2021(1), 190-210 [cit. 2021-03-17]. ISSN 1690-4524. Dostupné z: <http://www.iiisci.org/Journal/SCI/FullText.asp?var=&id=IP127LL21>
25. ZÁŠKODNÝ, P. 2005. Přehled základů teoretické fyziky (s aplikací na radiologii). Bratislava: Didaktis. 264 s. ISBN 80-89160-25-5
26. ZÁŠKODNÝ, P. 2015. Kurikulární proces fyziky – Aplikace edukačního datamingu. 2. vyd. Praha: Curriculum. 429 s. ISBN 978-80-87894-04-0
27. ZÁŠKODNÝ, Přemysl, 2021b. Data Mining Tools in Science Education and Their Resources. Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics [online]. 2021, 237-246 [cit. 2021-03-17]. ISSN 1690-4524. Dostupné z: <http://www.iiisci.org/Journal/SCI/FullText.asp?var=&id=IP129LL21>
28. ZÁŠKODNÝ, P. Základy pravděpodobnosti a statistiky (data miningový přístup) [PDF]. Praha: 2013. ISBN 978-80-904 948-5-5.
29. ZÁŠKODNÝ, Přemysl, Renata HAVRÁNKOVÁ, Jiří HAVRÁNEK a Vladimír VURM. Základy statistiky (s aplikací na zdravotnictví). třetí. Praha, Czech Republic: Curriculum, 2016. 256 s. Statistics and Probability. ISBN 978-80-87894-12-5.
30. Zobrazovací metody nukleární medicíny, 2020. 1. LÉKAŘSKÁ FAKULTA UNIVERZITY KARLOVY V PRAZE. Ústav nukleární medicíny [online]. [cit. 2021-01-04]. Dostupné z: <https://unm.lf1.cuni.cz/zobrazov.html>
31. ZVÁROVÁ, Jana, 2016. Základy statistiky pro biomedicínské obory. 3. vydání. Praha: Karolinum. Biomedicínská statistika. ISBN 978-80-246-3416-6.

7. Seznam obrázků, grafů a tabulek

Obr. 1: H.O. Anger.....	13
Obr. 2: Grafické znázornění rozpadového zákona.....	18
Obr. 3: Závislost rozpadové konstanty na energii alfa částic.....	19
Obr. 4: Grafické znázornění absorpčního zákona.....	20
Obr. 5: Braggova křivka pro alfa záření radia C ve vzduchu.....	21
Obr. 6: Fotoelektrický jev.....	23
Obr. 7: Comptonův jev.....	23
Obr. 8: Comptonův rozptyl.....	25
Obr. 9: Tvorba elektron-pozitronových párů.....	26
Tabulka 10: Elementární statistické zpracování.....	41
Obrázek 11: Polygon empirického rozdělení absolutních četností.....	42
Obrázek 12: Polygon empirického rozdělení relativních četností.....	42
Obrázek 13: Polygon empirického rozdělení kumulativních četností.....	43
Tabulka 14: Výpočty Pearsonova χ^2 – testu dobré shody.....	46
Tabulka 15: Výpočty Pearsonova χ^2 – testu χ^2_{exp}	46
Tabulka 16: Elementární statistické zpracování (bez odlehlých dat).....	48
Tabulka 17: Elementární statistické zpracování (bez odlehlých dat).....	49

8. Přílohy

Edukační text – Fyzikální podstata radionuklidové diagnostiky a terapie

Edukační test – Dotazník pro radiologické asistenty

Příloha A Edukační text

Fyzikální podstata radionuklidové diagnostiky a terapie

Nukleární medicína je lékařský obor, který se zabývá diagnostikou a léčbou pomocí otevřených radioaktivních zářičů aplikovaných do vnitřního prostředí organismu. Velkou součástí nukleární medicíny jsou právě zobrazovací metody, v menším zastoupení pak laboratorní diagnostika a léčba. Zobrazovací metoda, která se v nukleární medicíně využívá, se nazývá scintigrafie (podle scintilačního detektoru) nebo gamagrafie (podle záření gama emitovaného radionuklidu). Při scintigrafii jsou scintilační kamerou snímány obrazy prostorového rozložení aplikovaného radionuklidu ve vyšetřované oblasti.

Nukleární medicína vychází z mnoha vědeckých objevů, mezi které jistě patří objev rentgenových paprsků Wilhelmem Röntgenem v roce 1895. Za objevem metody indikátorového principu v roce 1913 stojí maďarský chemik György Hevesy. Rozšíření klinického využití začalo na počátku padesátých let, kdy byl vyvinut vysoce směrově citlivý detektor a bylo tak umožněno diagnostikovat onemocnění a měřit funkce štítné žlázy. V roce 1951 vzniknul pohybový scintigraf, který umožnil zobrazování distribuce radiofarmaka v těle, H.O. Anger zkonstruoval první scintilační gamakameru v roce 1958. Během následujících padesáti let docházelo k obrovskému rozvoji přístrojové techniky, scintigrafická vyšetření se rozšířila téměř do všech klinických oborů.

Stavba atomového jádra

Atom se skládá z těžkého jádra, které obsahuje kladně nabitě částice – protony a částice bez náboje – neutrony. Společně se protony a neutrony nazývají nukleony. Okolo jádra se v elektronovém obalu vyskytují záporně nabitě částice – elektrony. Atom je jako celek elektricky neutrální, jelikož se počet elektronů v atomovém obalu rovná počtu protonů v jádře. Atomy, které se od sebe neliší počtem protonů od počtu neutronů, nazýváme nuklidy.

Každý nuklid je charakterizován protonovým (atomovým) číslem Z , které je rovno počtu protonů v jádře, a hmotnostním (nukleonovým) číslem A , které je dáno součtem počtu protonů a neutronů v jádře.

Nuklidy, které mají stejný počet protonů, ale různý počet neutronů, se nazývají izotopy. Izotopy mohou být stabilní nebo nestabilní, pro nestabilní používáme název radionuklid. Radionuklidy jsou schopné samovolné radioaktivní přeměny jader, během níž se uvolňuje radioaktivní záření. Každý radionuklid má svůj charakteristický poločas rozpadu, druh přeměny a aktivitu.

Radioaktivní přeměna tedy znamená změnu počtu neutronů nebo protonů a snížení vazebné energie jádra, která se předává emitovanému typu záření. Stabilita nebo nestabilita jádra závisí na vzájemném uplatnění odpuzivé elektrické síly a jaderné síly.

Radioaktivita

Radioaktivita je jev, kdy dochází k přeměně nestabilních jader určitého radionuklidu v jádra stabilní jiného nuklidu za současného vzniku jaderného záření. Nestabilní jádro, které se přeměňuje, nazýváme mateřské a jádro, které vzniká, dceřiné.

Radioaktivita se dělí na přirozenou a umělou. U přirozené radioaktivity dochází k vzniku záření u spontánně se měnících jader, která se vyskytují v přírodě. Přirozená radioaktivita vzniká bez zásahu člověka. Její příčinou je přechod jader z méně stabilních stavů do stavů stabilnějších. Umělá radioaktivita vzniká naopak u jader, která byla vyrobena uměle, například v urychlovačích částic nebo jaderných reaktorech. Umělou radioaktivitu lze vyvolat například ostřelováním stabilních jader alfa částicemi a neutrony.

Rozpadové řady

U těžkých jader nestabilních izotopů může docházet k řadám přeměn, které vedou ke vzniku stabilního prvku a zároveň je vysíláno α záření (alfa rozpad jádra), β záření (beta rozpad jádra) nebo γ záření (gama rozpad jádra). Během radioaktivního rozpadu dojde ke vzniku dceřiného jádra, které se znovu rozpadá na další jádro a tento proces se opakuje, dokud nedojde k vzniku již stabilního atomového jádra. V takovém případě mluvíme o tzv. rozpadové řadě. Přirozeně radioaktivní prvky tvoří čtyři radioaktivní rozpadové řady, které končí stabilními izotopy olova nebo bismutu.

- Thoriová rozpadová řada – začíná ^{232}Th a končí ^{208}Pb
- Neptuniová rozpadová řada – začíná ^{237}Np a končí ^{205}Tl
- Uran-radiová rozpadová řada – začíná ^{238}U a končí ^{206}Pb
- Uran-aktiniová rozpadová řada – začíná ^{235}U a končí ^{207}Pb

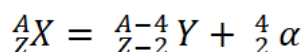
Je-li vzat v úvahu alfa rozpad, nukleonové číslo při rozpadu klesne o 4, proto všechna atomová jádra dané rozpadové řady mají při dělení hmotnostního čísla číslem 4 vždy stejný zbytek (0, 1, 2 nebo 3). Nukleonová čísla členů thoriové řady odpovídají vzorci $4n$, řady neptuniové vzorci $4n+1$, řady urano-rádiové vzorci $4n+2$ a řady aktiniové vzorci $4n+3$.

Druhy záření

Záření α : Výsledkem α přeměny je emise částice alfa, kterou tvoří 2 protony a 2 neutrony, jedná se o jádro prvku helia. Vzniklé dceřiné jádro má o dva protony méně

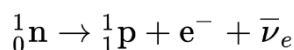
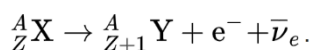
a dceřiný nuklid se tedy posune v periodické soustavě prvků vzhledem k mateřskému prvku o dvě místa vlevo. Protonové číslo Z se tedy zmenší o 2, nukleonové číslo A se zmenší o 4 ($A = 4, Z = 2$).

Posouvání prvku v Mendělejevově periodické tabulce v důsledku radioaktivní přeměny je nazýváno Fajansovým-Soddyho posuvným pravidlem.



Při průchodu prostředím částice alfa silně ionizují i excitují, avšak rychle ztrácejí svojí energii a jejich pronikavost ve vzduchu je několik milimetrů, ve tkáni zhruba 0,03 mm. Záření alfa je proto nebezpečné pouze při vnitřní kontaminaci organismu.

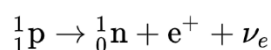
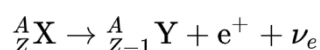
Záření β^- : Při přeměně β^- je emitován z mateřského jádra elektron. Dochází k tomu, že se rozpadá neutron na proton a elektron. Protony zůstávají v jádře, ven vylétají jenom elektrony. Kromě těchto elektronů z jádra vylétá také elektricky nenabitá částice s malou hmotností – antineutrino. Počet protonů se v jádře zvýší o jeden a nově vzniklý dceřiný nuklid se posune v periodické tabulce prvků o jedno místo doprava.



β^- záření se společně s α zářením využívají výhradně pro terapeutické účely díky jejich vysoké absorpci v tkáni, a proto slouží jen k lokálnímu ozáření.

Záření β^+ : Na rozdíl od β^- přeměny, kde emitují z jádra elektrony, jsou v tomto případě emitovány z jádra pozitrony (antičástice k elektronu). Pozitron má stejně jako elektron malou hmotnost a elementární náboj, nicméně kladný.

Při této přeměně dochází k tomu, že se proton v jádře změní na neutron a pozitron, za vzniku neutrina. Následně je emitován pozitron a neutron zůstává v jádře. Protonové číslo mateřského jádra se zmenší, a tím se vzniklý dceřiný radionuklid posune v periodické tabulce o jedno místo doleva.



Obecně se částice β pohybují velmi rychle a pronikavost částic je vyšší než u α částic, mohou proniknout materiály s nízkou hustotou nebo malou tloušťkou. Střední dosah v tkáni je cca 1-4 mm.

Záření γ : Zatímco alfa a beta záření jsou prvotními jevy, vysílání gama záření je jevem průvodním. Při přeměně alfa a beta vzniká dceřiné jádro v energeticky excitovaném stavu a při přechodu do základního stavu dochází k uvolnění přebytečné energie vyzářením elektromagnetického záření – záření γ . Při této přeměně se nemění počet protonů ani neutronů v jádře.

Záření γ má krátkou vlnovou délku s velkou energií a pronikavostí částic. Oproti záření α a β , které jsou korpuskulární, proniká γ záření do materiálu lépe a ke snížení intenzity záření se používají vrstvy materiálů obsahujících těžké prvky jako je například olovo.

Společně s β^+ zářením je záření γ je použitelné pro diagnostické účely, neboť jejich nízká absorpce v těle umožňuje zevní detekci.

Rozpadový zákon

Rozpadový zákon charakterizuje ubývání mateřského prvku s časem, a to za předpokladu, že pravděpodobnost radioaktivní přeměny jádra během zvoleného časového intervalu je pro každý mateřský prvek konstantní. Zjednodušeně rozpadový zákon popisuje právě zdroje ionizujícího záření a vznik radioaktivity.

Matematicky je zákon formulován následujícím způsobem:

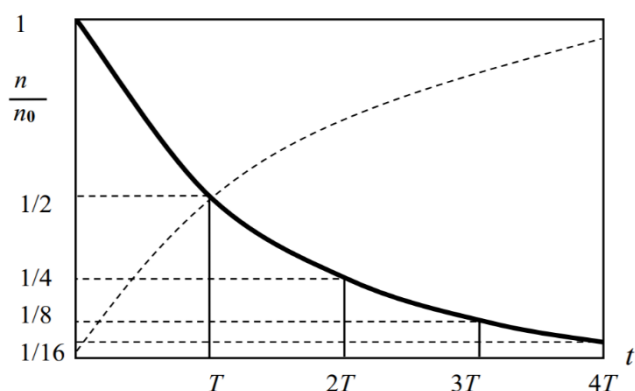
$$n = n_0 e^{-\lambda t}$$

$$n = n_0 e^{-\frac{\ln 2}{T} t}$$

V rozpadovém zákoně je n – počet mateřských prvků v čase t a n_0 – počet mateřských prvků v čase t_0 . Řecké písmeno λ označuje rozpadovou konstantu, která udává pravděpodobnost, s jakou se mateřský prvek přemění na dceřiný za 1 sekundu. Protože má pravděpodobnostní charakter, obvykle se používá poločas rozpadu $T_{1/2}$, který představuje dobu, za kterou se rozpadne polovina mateřských jader (tj. za čas $t=T$ bude

$$n = n_0/2).$$

Na obrázku je graficky znázorněn rozpadový zákon, kde klesající křivka znázorňuje množství mateřských prvků (plná křivka) a rostoucí křivka představuje přibývajícím množství dceřiných prvků (čárkovaná křivka), vždy v závislosti na počtu poločasů rozpadu:



Obr. 1: Grafické znázornění rozpadového zákona zdroj: ZÁŠKODNÝ, P. Přehled základů teoretické fyziky (s aplikací na radiologii). Bratislava: DIDAKTIS, 2005. ISBN 80-89160-25-5.

Např. při přeměnách mateřských prvků spojených s alfa zářením dosahují alfa částice rychlosti kolem 2 % rychlosti světla a jejich energie leží zhruba mezi 4 MeV a 9 MeV. Srovnání energie ϵ_α alfa částic s pravděpodobností alfa rozpadu mateřského prvku (tj. s rozpadovou či přeměnovou konstantou λ) ukazuje, že mezi těmito veličinami existuje **přímá závislost**.

Kvantitativně je tato závislost vystižena **Geigerovým-Nuttalovým zákonem**:

$$\log \lambda = A_1 + A_2 \log \epsilon_\alpha$$

A_1 a A_2 představují empirické konstanty. energii ϵ_α alfa částic lze s dostatečnou přesností vyjádřit jejich počáteční kinetickou energií T_α . Pak lze Geigerův-Nuttalův zákon přepsat ve tvaru:

$$\log \lambda = A_1 + A_2 \log T_\alpha$$

Absorpční zákon

Zatímco rozpadový zákon popisuje ubývání mateřských jader s časem a jejich přeměnu na jádra dceřiná, absorpční zákon charakterizuje úbytek intenzity záření v závislosti na hloubce. Absorpční zákon tak popisuje interakci ionizujícího záření s prostředním, kdy jsou částice záření při těchto interakcích pohlcovány, přeměňovány a rozptylovány.

Odvození absorpčního zákona vychází z předpokladu, že pravděpodobnost úbytku původní částice je během zvoleného intervalu tloušťky pro každou částici konstantní (bez ohledu jak na polohu intervalu vzdálenosti na stupnici tloušťky, tak i na energii částice).

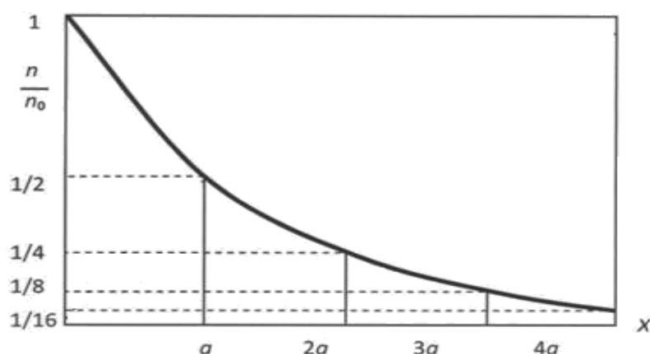
Matematickou podobu absorpčního zákona lze zapsat ve tvarech:

$$n = n_0 e^{-\mu x},$$

$$n = n_0 e^{-\frac{\ln 2}{a} x}$$

V těchto tvarech je n_0 je počet částic, který dopadne na rozhraní s danou látkou (tj. pro $x = 0$), n je počet částic, které se dostaly do hloubky x příslušné látky. Počet částic se zmenšuje s rostoucí hloubkou x . Řecké písmeno μ označuje pravděpodobnost úbytku částice v jednotkovém intervalu hloubky (tloušťky) a v absorpčním zákoně se nazývá **koeficient absorpce**. Písmeno a je polotloušťka (polovrstva) příslušné látky, ve které bude úbytek částic roven polovině původního počtu částic (v hloubce $x = a$ pod rozhraním s danou látkou bude počet neabsorbovaných částic roven polovině původního počtu částic, tj. $n = n_0/2$).

Na níže uvedeném obrázku je graficky znázorněn absorpční zákon, kde klesající křivka znázorňuje ubývající počet částic v závislosti na hloubce x pod rozhraním s danou látkou. Hloubka x je vyjadřována v násobcích polotloušťky a příslušné látky, se kterou ionizující záření interaguje.



Obr. 2. Grafické znázornění absorpčního zákona. Zdroj: ZÁŠKODNÝ, P. Přehled základů teoretické fyziky (s aplikací na radiologii). Bratislava: DIDAKTIS, 2005. ISBN 80-89160-25-5.

Interakce ionizujícího záření s prostředím

Jevy, které jsou spojené s průchodem ionizujícího záření prostředím (v nukleární medicíně jde o interakce s tkáněmi), jsou úzce spojeny právě s absorpčním zákonem. Tyto interakce s hmotným prostředím jsou různé pro různé typy ionizujícího záření.

Jedním z faktorů, které interakce ovlivňují, je náboj ionizující částice. Záření lze díky tomu rozdělit na dvě skupiny: přímo ionizující a nepřímo ionizující záření. Přímé ionizující záření je tok částic, které mají elektrický náboj a mohou tak vyrážet elektrony z atomů přímo – dochází k přímé ionizaci. Jedná se o záření α , β^+ , β^- , protonové záření apod. Nepřímo ionizující záření je naopak tok částic bez náboje, které předávají energii jiným nabitým částicím. Jejich prostřednictvím pak původní nenabitě částice nepřímo ionizují nebo excitují jádra v hmotném prostředí. Mezi tyto druhy záření patří záření γ , rentgenové záření, neutronové záření a další.

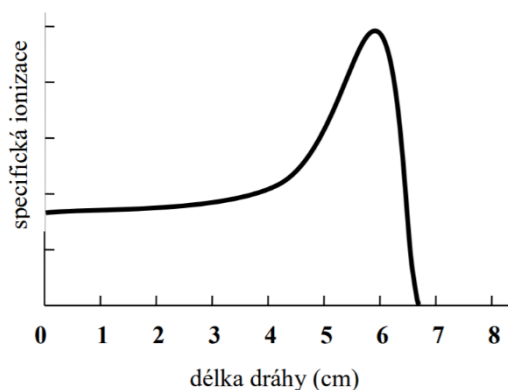
- **Interakce záření α**

Zeslabení alfa záření je spojeno především s ionizací (při každé srážce např. s molekulou plynu ztrácí alfa částice energii spotřebovanou na ionizaci). Zhruba polovina energie částice je předána během ionizace a druhá polovina se ztrácí důsledkem excitace.

Pokud bychom zkoumali počet iontových párů (kladných iontů a elektronů) vytvořených alfa částicí například na délce dráhy 1 mm, lze ukázat, že na počátku dráhy si tato specifická ionizace udržuje přibližně konstantní hodnotu a pomalu stoupá, poté však ke konci doletu částice specifická ionizace vzrůstá více než dvakrát. Křivka této

ionizace je popsána tzv. **Braggovou křivkou** a maxima dosahuje několik mm od konce doletu alfa částice.

Na obrázku Obr.3 je schematicky znázorněna Braggova křivka pro alfa záření radia C ve vzduchu.



Obr. 3: Braggova křivka pro alfa záření radia C ve vzduchu, zdroj: ZÁŠKODNÝ, P. Přehled základů teoretické fyziky (s aplikací na radiologii). Bratislava: DIDAKTIS, 2005. ISBN 80-89160-25-5.

- **Interakce záření β^-**

Elektron při průletu hmotným prostředím atomy ionizuje nebo excituje. Dosah doletu elektronu závisí na jejich energii a objemové hmotnosti prostředí. Při průchodu elektronu prostředím může vznikat brzdné rentgenové záření vlivem silného přibrzdění elektronu při průchodu elektrickým polem jádra i celého atomu. Brzdné záření má spojité spektrum a uplatňuje se při vyšších energiích elektronů.

- **Interakce záření β^+**

Pozitron se pohybuje podobně jako elektron. Při setkání s elektronem dojde k anihilaci elektronu a pozitronu. Obě částice zaniknou, přitom se vyzáří dva gama fotony. V nukleární medicíně je tento jev běžně pozorován v PET diagnostice.

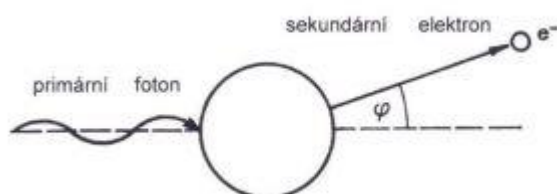
- **Interakce záření γ**

Při průchodu hmotným prostředím dochází ke zeslabování gama záření prostřednictvím tří jevů – fotoelektrickým jevem, Comptonovým jevem a obráceným anihilačním jevem. Výskyt těchto jevů je závislý na energii záření a na objemové hmotnosti prostředí. Obecně platí, že se zvyšující se energií stoupá podíl Comptonova rozptylu a se zvyšující se hustotou materiálu stoupá podíl fotoelektrického jevu. V nukleární medicíně to znamená, že v měkkých tkáních bude převažovat interakce

Comptonovým rozptylem a v materiálech, obsahující prvky s vyšším atomovým číslem (jako např. olovo), bude převažovat fotoelektrický jev.

Fotoelektrický jev

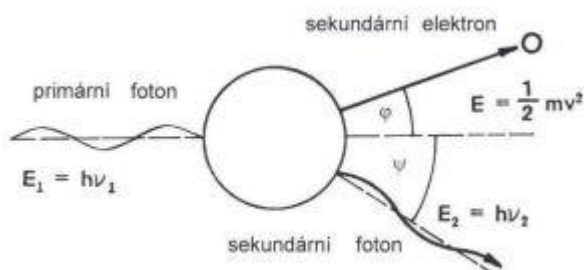
Fotoefekt nastává v případě, že foton gama předá celou svou energii silněji vázanému elektronu v atomovém obalu a tím elektron z obalu uvolní za předpokladu, že je energie fotonu vyšší než vazebná energie elektronu. Tento tzv. fotoelektron (sekundární elektron) je vyražen mimo atom a při průchodu prostředím ionizuje a excituje atomy. Jeho místo v atomovém obalu se zaplní elektronem z jiné slupky obalu, přebytek energie se vyzáří ve formě fotonu (ten má však malou energii a s velkou pravděpodobností bude absorbován rovněž v hmotném prostředí).



Obr. 4: Fotoelektrický jev, zdroj: <http://fbmi.sirdik.org/>

Comptonův jev

Jedná se o interakci fotonu se slaběji vázaným elektronem, kterému předá foton pouze část své energie. Vyražený Comptonův elektron prochází prostředím a stejně jako při fotoefektu ionizuje a excituje atomy. Foton po srážce pokračuje dále s nižší energií a v jiném směru, může následně ztratit svou energii při fotoefektu nebo znovu Comptonovým rozptylem. V hmotném prostředí může tak docházet k vícenásobnému rozptylu, dokud foton gama neunikne z tohoto prostředí.



Obr. 5: Comptonův jev, zdroj: <http://fbmi.sirdik.org/>

Obrácený anihilační jev

Vznik dvojice elektron-pozitron lze pozorovat u gama záření s energií vyšší než 1 MeV. Při tomto jevu proniká foton obvykle do velké blízkosti jádra atomu a při jeho zániku dojde ke vzniku elektron-pozitronového páru.

Radionuklidová diagnostika

Jak bylo již v úvodu zmíněno, zobrazovací metodou nukleární medicíny je tzv. scintigrafie. Tento název je odvozen od scintilačního detektoru, který detekuje záření vycházející z těla vyšetřovaného pacienta, jemuž byl podán radionuklid ve formě tzv. radiofarmaka. Absorpce záření v detektoru vyvolá světelné záblesky (scintilace), které jsou následně elektronicky zpracovány a vyhodnocovány. Výsledný snímek zobrazí, jak se radiofarmakum distribuuje v organismu vyšetřovaného.

Scintigrafii můžeme rozdělit na statickou, kdy se sleduje rozložení radiofarmaka ve tkáni, a na dynamickou, kde se zachycuje změna radiofarmaka v čase. Dynamickou cestou tak lze posoudit funkce vyšetřovaného orgánu (např. transport jícnem, vylučování ledvinami, aj.)

Jelikož je záření emitováno právě ze zdroje uvnitř organismu, patří tomografické zobrazení v nukleární medicíně mezi zobrazení emisní. Emisní tomografii lze dále dělit na jednofotonovou SPECT (Single-Photon Computed Emission Tomography), kdy se zaznamenává prostorová distribuce radiofarmaka, který vysílá vždy jeden foton gama. SPECT slouží jako tomografická varianta k planární scintigrafii. K emisní tomografii je dále řazena pozitronová emisní tomografie PET (positron emission tomography), ve které se detekují anihilační fotony vznikající při interakci (anihilaci) pozitronu s elektronem v těle pacienta. Pro toto zobrazení se podávají radionuklidy emitující pozitrony. V současnosti je PET nejlepší metodou pro zobrazení funkčních dějů v organismu. Dnes se také používají kombinované (hybridní) přístroje, které kromě SPECT a PET kamery obsahují navíc CT (SPECT/CT a PET/CT). Tato kombinace dodává podrobnější informaci o uložení patologického ložiska zobrazeného pomocí scintigrafie.

Radionuklidová diagnostika je stále se rozvíjejícím oborem, vznikají další radiofarmaka a zlepšují se možnosti přístrojové techniky, díky tomu je spektrum klinických aplikací čím dál tím obsáhlejší. Patří sem diagnostika v nukleární kardiologii

(perfuze myokardu, flebografie), diagnostika trávicího systému (jícen – např. hodnocení gastroezofageálního refluxu), vyšetření plic (perfuze a ventilace plic v diagnostice plicní embolie), vyšetření ledvin (posouzení funkce ledvin – vylučování, reflux, aj.), vyšetření endokrinního systému (nejčastěji štítná žláza a příštítná tělíska), scintigrafie skeletu (detekování kostních lézí), zánětlivé procesy, vyšetření nervového systému (perfuze mozku) a také onkologická diagnostika (dnes dominuje hlavně PET, ve vybraných indikacích i SPECT/CT).

Radionuklidová terapie

Terapie pomocí otevřených zářičů slouží pro ozáření nádorové či jiné tkáně za účelem poškození až úplné destrukce cílového objemu. Předpokladem je, že budou okolní struktury ovlivněny léčbou minimálně. V současnosti se využívá především záření β^- , kdy se může jednat o čisté β^- zářiče (například ^{90}Y) nebo smíšené zářiče β^- , γ (např. ^{131}I). Otevřené zářiče α se zatím v terapii neuplatňují, ale v posledních letech probíhají studie zaměřené právě na tyto zářiče – je u nich očekávána větší léčebná účinnost.

Mezi nejčastější indikace léčby pomocí otevřených zářičů patří pacienti s nemocemi štítné žlázy, kde se využívá ^{131}I , který je fyziologicky vychytáván normální tyreoidální tkání (schopnost akumulovat jód mají i diferencované karcinomy). Využívá se především pro léčbu hyperfunkce štítné žlázy a diferencovaných karcinomů štítné žlázy.

Pro paliativní léčbu kostních metastáz, kde je hlavním cílem zmírnit bolest doprovázející onemocnění, se využívají osteotropní radiofarmaka, emitující záření β^- (například ^{89}Sr – konkrétně $^{89}\text{SrCl}$). Analgetický efekt je způsoben lokálním ozářením metastatických buněk, okolních kostních struktur a nervových zakončeních.

Dalším příkladem z mnoha druhů terapií pomocí radionuklidů je léčba zvaná synoviortéza, která se provádí u pacientů s revmatickými nebo degenerativními onemocněními kloubů. Metoda je založena na intraartikulární aplikaci radiofarmaka. Příkladem je ^{90}Y , který se využívá pro onemocnění postihující kolenní kloub. Redukuje se tak bolest a zmírňují se zánětlivé projevy (např. výpotek, otoky).

Příloha B Edukační test

Dotazník pro radiologické asistenty

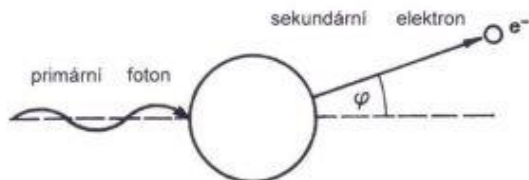
1. Diagnostická zobrazovací metoda využívaná v nukleární medicíně se nazývá:
 - a) Scintigrafie
 - b) Skiografie
 - c) Skiaskopie
 - d) Scintilace
2. První scintilační kameru zkonstruoval:
 - a) W. Röntgen
 - b) Györg Heves
 - c) H. O. Anger
 - d) Henri Becquerel
3. Každý nuklid je charakterizován protonovým (atomovým) číslem Z a hmotnostním (nukleonovým) číslem A . Různé izotopy prvku jsou určeny:
 - a) shodným Z a shodným A
 - b) odlišným Z a shodným A
 - c) shodným Z a odlišným A
 - d) odlišným Z a odlišným A
4. Při jaké radioaktivní přeměně je emitován z mateřského jádra elektron:
 - a) alfa
 - b) beta mínus
 - c) beta plus
 - d) gama
5. Z hlediska vnitřní kontaminace je nejvíc nebezpečné:
 - a) alfa záření
 - b) rentgenové záření
 - c) gama záření
 - d) beta záření
6. Mezi přímo ionizující záření nepatří:
 - a) Záření α
 - b) Záření β^+
 - c) Záření β^-
 - d) Záření γ

7. Tvar rozpadového zákona s rozpadovou konstantou má tvar:
- $n = n_0 e^{-\lambda t}$
 - $n = n_0 e^{-\frac{\ln 2}{T} t}$
 - $n = n_0 e^{-\mu x}$
 - $n = n_0 e^{-\frac{\ln 2}{a} x}$
8. Tvar absorpčního zákona s koeficientem absorpce má tvar:
- $n = n_0 e^{-\lambda t}$
 - $n = n_0 e^{-\frac{\ln 2}{T} t}$
 - $n = n_0 e^{-\mu x}$
 - $n = n_0 e^{-\frac{\ln 2}{a} x}$
9. Rozpadový zákon charakterizuje
- ubývání intenzity záření v závislosti na hloubce
 - ubývání intenzity záření s časem
 - ubývání mateřských jader s časem
 - interakci ionizujícího záření s prostředním
10. Počet mateřských a dceřiných jader je stejný v čase
- $t = T$
 - $t = 2T$
 - $t = 3T$
 - $t = 4T$
11. Absorpční zákon charakterizuje
- ubývání intenzity záření v závislosti na hloubce
 - ubývání intenzity záření s časem
 - ubývání mateřských jader s časem
 - zdroje ionizujícího záření a vznik radioaktivity
12. Polovrstva (polotloušťka) je taková vrstva absorbátoru (tkáň), která zeslabí intenzitu záření na:
- 1/2
 - 1/3
 - 1/4
 - 1/8

13. Jev, kdy dochází při interakci pozitronu s elektronem ke vzniku dvou fotonů gama, se nazývá:

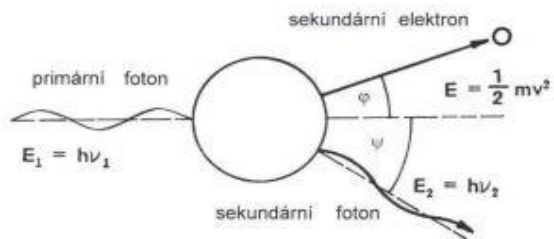
- a) Fotoelektrický jev
- b) Comptonův jev
- c) Anihilační jev
- d) Obrácený anihilační jev

14. Na obrázku je znázorněn:



- a) Fotoelektrický jev
- b) Comptonův jev
- c) Anihilační jev
- d) Obrácený anihilační jev

15. Na obrázku je znázorněn:



- a) Fotoelektrický jev
- b) Comptonův jev
- c) Anihilační jev
- d) Obrácený anihilační jev

16. Do emisní tomografie můžeme zařadit vyšetření pomocí:

- a) RTG
- b) CT
- c) SPECT
- d) MRI

17. Při pozitronové emisní tomografii (PET) se detekují:

- a) Fotony
- b) Elektrony
- c) Pozitrony
- d) Neutrony

18. Radionuklidová terapie, při které je využíván prvek ^{131}I , je indikována pro léčbu
- a) Kostních metastáz
 - b) Onemocnění štítné žlázy
 - c) Revmatická onemocnění kloubů
 - d) Neuroendokrinních nádorů