

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Přírodovědecká fakulta



Využití polovodičové spektrometrie gama v experimentální reaktorové fyzice

Bakalářská práce

Jan Kučera, DiS.

Školitelka: Ing. Marie Švadlenková, CSc.

České Budějovice 2012

Kučera J., 2012: Využití polovodičové spektrometrie gama v experimentální reaktorové fyzice.

[Application of semiconductor gamma spectrometry in experimental reactor physics. Bc. Thesis, in Czech.] – 63 p., Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Anotace

V této bakalářské práci byla pomocí softwaru fy Canberra vytvořena databáze pro účinnostní kalibraci s korekcí na pravé sumace gama-spektrometrického zařízení. Tvorba databáze spočívá v konstrukci modelu stínění pro polovodičový detektor a modelů měřených radioaktivních vzorků různých geometrií. Vytvořený model byl testován na změřených spektrech záření gama a vybraná vypočtená kalibrační křivka byla porovnána s výsledky vypočtenými v Centru výzkumu Řež pomocí metody MCNP. V rámci této práce byly též získány teoretické poznatky o technických parametrech a využití experimentálních reaktorů v CV Řež a o experimentálním zařízení a principech spektrometrie záření gama na reaktoru LR-0.

Abstract

In the present bachelor thesis, a database for efficiency calibration of a gamma-spectrometry device with cascade summing correction was built using software developed by the company Canberra. The formation of the database consists in the construction of a model for a shielding of semiconductor detector and of models for measured radioactive samples with various geometries. The designed model was tested on measured spectra of gamma radiation and a selected calibration curve was compared with the results obtained by Research Center Rez using the MCNP method. Moreover, several theoretical results were obtained in the course of this work, including the technical parameters and usage of experimental reactors at Research Center Rez and the principles of gamma radiation spectrometry in the LR-0 reactor.

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské 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 kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

.....
Datum

.....
Jan Kučera, DiS.

Poděkování:

Rád bych tímto poděkoval paní Ing. Marii Švadlenkové, CSc.
za poznatky a zkušenosti předané v průběhu řešení bakalářské práce.

Obsah

1. Cíle práce.....	1
2. Úvod.....	2
2.1. Popis pracoviště.....	2
2.2. Reaktory LR-15, LR-0 a experimentální smyčky.....	2
2.2.1. Reaktor LVR-15.....	2
2.2.2. Výzkumný reaktor LR-0.....	3
3. Teoretická část.....	6
3.1. Fluence částic.....	6
3.2. Metody měření fluence neutronů.....	6
3.2.1. Plynové detektory.....	6
3.2.2. Štěpné detektory.....	6
3.2.3. Aktivační analýza.....	7
3.2.4. Poproutkové měření – gama skenování ozářených palivových proutků.....	7
3.3. Radioaktivita a štěpení uranu.....	8
3.3.1. Radioaktivita.....	8
3.3.2. Štěpení uranu.....	10
3.4. Interakce záření gama a elektronů s hmotou.....	11
3.4.1. Fotoefekt	11
3.4.2. Comptonův jev.....	12
3.4.3. Tvorba párů.....	12
3.4.4. Interakce ionizujících elektronů	13
3.5. Spektrometrie záření gama s HPGe-detektorem.....	14
3.5.1. HPGe detektor.....	14
3.5.2. Energetické rozlišení detektoru.....	15
3.5.3. Časové rozlišení detektoru.....	15
3.5.4. Mrtvá doba detektoru.....	15
3.5.5. Sumační píky.....	15
3.5.6. Energetická kalibrace detektoru.....	16
3.5.7. Účinnostní kalibrace.....	16
4. Praktická část.....	17
4.1. Program Genie 2000 a jeho moduly pro kalibraci.....	17
4.2. Programový modul Geometry Composer.....	18
4.2.1. Ovládání programu.....	18

4.2.2. Postup při vytváření nové geometrie.....	18
4.2.3. Kolimátor (Collimator).....	19
4.2.4. Podvodní opláštění (Underwater housing).....	20
4.2.5. Absorbátory.....	20
4.2.6. Generování bodů pro účinnostní kalibrační křivku.....	21
4.2.7. Materiálová knihovna (Material library).....	21
4.3. Vytvoření modelů geometrie pro gama-skenování.....	22
4.3.1. Palivový proutek naplněný UO ₂ a s jedinou tabletou UO ₂	22
4.3.2. Tableta s CS ₂ O.....	22
4.3.3. Etalony typu EG.....	23
4.3.4. Stínění.....	24
4.4. Provázání Geometry Composer a Gamma Acquisition & Analysis.....	25
5. Výsledky.....	27
5.1. Tabulky a zhodnocení jednotlivých měření	27
5.1.1. Etalony EG3 – 3 cm štěrbina kolimátoru.....	27
5.1.2. Etalony EG3 – 2 cm štěrbina kolimátoru.....	28
5.1.3. Tableta cesia.....	28
5.1.4. Uranová tableta.....	29
5.1.5. Měření palivového proutku UO ₂	29
5.2. Grafy účinnostních korekčních křivek a jejich srovnání.....	30
5.2.1. Měření na etalonech EG3 – 2 cm štěrbina.....	31
5.2.2. Měření na etalonech EG3 – 3 cm štěrbina.....	31
5.2.3. Měření tablety cesia.....	32
5.2.4. Měření tablety s UO ₂	33
5.2.5. Měření palivového proutku UO ₂	33
6. Závěr.....	36
7. Seznam literatury.....	38
8. Přílohy.....	40
8.1. Přílohy teoretické části.....	40
8.1.1. HPGe Coaxial Detector – model number GEM70-PLUS.....	43
8.2. Přílohy k praktické části.....	44
8.2.1. Obecný postup vytváření nové geometrie v Geometry Composer pro účinnostní kalibraci v programu ISOCS.....	44

8.2.2. Postup tvorby konkrétního modelu geometrie pro gama-skenování UO_2 tablety v palivovém proutku v Geometry Composer	49
8.2.3. Výpočty pro nahrazení kruhového průřezu průřezem čtvercovým.....	50
8.2.4. Výpočty pro nahrazení vrstvy železa vrstvou olova po obvodu.....	52
8.2.5. Výpočty pro nahrazení vrstvy železa vrstvou olova na čele stínění.....	54
8.2.6. Vývojové diagramy pro jednotlivé část programu Geometry Composer.....	55
8.2.7. Nákresy válcového stínění.....	57
8.2.8. Nákresy kvádrového stínění.....	59
8.2.9. Nákres pro porovnání změn.....	61

1. Cíle práce

- 1.1 Seznámit se s technickými parametry a využitím experimentálních reaktorů v CV Řež, s experimentálním zařízením a principy spektrometrie záření gama na reaktoru LR-0.
- 1.2 Pomocí softwaru fy Canberra připravit databázi pro účinnostní kalibraci s korekcí na pravé sumace spektrometrického zařízení, spočívající ve vytvoření modelu stínění pro polovodičový detektor a měřených radioaktivních vzorků, zejména palivových prouteků.
- 1.3 Vytvořenou databázi využít v programu Genie 2000 (fy Canberra) pro vyhodnocení naměřených spekter záření gama.
- 1.4 Porovnat výsledky s výsledky vypočítanými v CV Řež pomocí metody MCNP.

2. Úvod

2.1. Popis pracoviště

Centrum výzkumu Řež s.r.o. (zkr. CVŘ) bylo založeno v r. 2002 a patří do skupiny Ústavu Jaderného Výzkumu Řež a.s. [1]. Zaměřuje se na výzkum a vývoj v oblasti energetiky, zejména jaderné. K tomu využívá v České Republice unikátní výzkumné centrum s experimentálními reaktory LVR-15, LR-0 (popis v odst. 2.2.) a technologické smyčky.

V rámci rozvoje projektů zajišťuje CVŘ rozvoj a podporu předmětu podnikání společnosti skrze dotační projekty. Jsou to projekty na interní, národní a mezinárodní úrovni (zdroj MŠMT, MPO, TAČR, EUPRO, EURATOM, atd.).

CVŘ se účastní např. projektu s mezinárodní účastí na výstavbě výzkumného reaktoru „Jules Horowitz Reactor“ (zkr. JHR) ve Francii. JHR je mezinárodní projekt koncepce a výstavby nového vysoce výkonného jaderného reaktoru pro výzkum v oblasti materiálů a jaderného paliva.

Dalším projektem CVŘ je např. SUSEN (projekt udržitelné energetiky, celkový rozpočet 100 M€), který byl koncem roku 2011 schválený Evropskou komisí. Cílem projektu SUSEN je vybudování špičkového výzkumného centra zaměřeného na pokročilé jaderné technologie.

CVŘ též podporuje orgány státní správy tím, že poskytuje technickou a odbornou podporu především Státnímu úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB) nezávisle na zpracovatelích bezpečnostních zpráv jaderných elektráren (JE).

2.2. Reaktory LR-15, LR-0 a experimentální smyčky

2.2.1. Reaktor LVR-15

Jedná se o reaktor lehkovodního typu uzavřeného v nerezové nádobě s nuceným chlazením a využívající palivo typu IRT-4M, výkonem za provozu 10MW. Obvykle bývá v provozu nepřetržitě po 3 týdny s následnou přestávkou 10 - 14 dní. Jako moderátor a chladiivo slouží demineralizovaná voda.

LVR-15 je tzv. víceúčelový reaktor, který poskytuje služby v oblasti reaktorové techniky, materiálového výzkumu, výroby radioizotopů a zároveň slouží jako zdroj neutronů pro základní výzkum. [2]

2.2.2. Výzkumný reaktor LR-0

Jedná se o lehkovodní reaktor tzv. nulového výkonu, což znamená že veškerý jeho tepelný výkon se spotřebuje na ochlazování vody okolo reaktoru, která se díky svému množství nijak významně neohřeje.

Tento reaktor se využívá pro měření související s fyzikou aktivní zóny a stínění reaktorů VVER/PWR, experimenty související s problematikou vyhořelého paliva a výzkum vlivu procesů v reaktoru na jeho tlakovou nádobu. Konstrukce toho reaktoru umožňuje provádět experimenty s různým počtem palivových kazet, druhem (obohacení) paliva a různou koncentrací kyseliny borité (H_3BO_3) v moderátoru. Dále lze na tomto reaktoru provádět pokusy zabývající se modelováním neutronových polí reaktorů, benchmark 1 : 1.

Hlavní projekty a experimenty na reaktoru LR-0: [3]

- Měření rozložení toku neutronů v palivových proutcích a kazetách s a bez použití absorpčních klastrů (měření na výšku i uvnitř)
- Problematika skladování vyhořelého paliva = jeho záření a bezpečnost
- Modely kazet reaktorů VVER-400 a VVER-1000 - měření toku neutronů a jeho rozložení s ohledem na biologické stínění a dozimetrické měření
- Časoprostorová kinetika
- Experimenty související s novým navrhovaným rozložením palivových kazet
- Vliv regulačních kazet v VVER-400 a studie vlivu částečně vložené kazety na tok neutronů v palivu
- Studie vyhořívajících absorbátorů Gd a CrB₂.

2.2.2.1. Konstrukce reaktoru LR-0

Reaktor pracuje na bázi reakce tepelných neutronů se štěpným materiálem v palivových proutcích obsahujících uranové tablety s ^{235}U . Štěpná reakce lze řídit výškou hladiny vody obsahující kyselinu boritou (H_3BO_3) s koncentrací až 12 g/l, případně ovlivnit experimentálním klastrem. Maximální tepelný výkon je 1kW, což moderátor v reaktoru, přibližně 20 m³, neohřeje ani o 1 °C. Přestože reaktor nedosáhne ani $1 \cdot 10^{-6}$ výkonu v JE Temelín, veškeré procesy probíhají stejně. I když má LR-0 oproti reaktorům v Temelíně nebo v Dukovanech jednodušší konstrukci, lze v něm zkoumat určité procesy probíhající právě v energetických reaktorech. Schéma LR-0 je v Příloze 1, Obr. P1.1.

Bezpečnostních opatření je několik, například výběr 2 ze 3, kdy se ze 3 řídicích jednotek vybere to rozhodnutí, které je většinou zastoupené. Dále lze běh reaktoru zastavit zasunutím absorpčních tyčí a běh také zastaví rychlé vypuštění moderátoru do nádrže. [4]

2.2.2.2. Nádoba reaktoru LR-0

Samotná nádoba reaktoru je v stínícím betonovém obalu. Je vyrobena ze dvou dílů hliníku o vysoké čistotě (99,5 %). Průměr nádoby je 3,5 m a její výška činí 6,5 m při tloušťce stěn 16 mm a tloušťce dna 25 mm. Horní část má tvar čtverce o rozměrech 6 x 6 m a výšce 1,5 m a je se spodní částí svařena v jeden celek. [4]

2.2.2.3. Aktivní zóna reaktoru LR-0

Jaderné palivo je vkládáno do aktivní zóny reaktoru v geometriích určených nosnou deskou, která se může měnit podle potřeb experimentů. Kromě palivových kazet, tyčí a klastrů s absorbatorem jsou zde přítomny i hliníkové trubky o rozměrech 80 x 5 mm určené pro měřicí přístroje. Základní symetrická konf. AZ (počet kazet): 7, 19, 31, 55, 85, 121. [4]

2.2.2.4. Moderátor reaktoru RL-0

Jako moderátor je zde použita demineralizovaná voda obsahující kyselinu boritou (H_3BO_3) o koncentraci 0 až 12 g na litr vody. Tento moderátor slouží ke zpomalení rychlých neutronů, které vzniknou při štěpení uranu, na rychlost tepelných neutronů, které se mohou dále účastnit štěpné reakce. Koncentraci kyseliny borité ve vodě lze měnit i za běhu reaktoru a řídit tak procesy probíhající v reaktoru. Maximální teplota moderátoru za provozu je 70°C, této teploty je dosaženo vnější ohřevem. [4]

2.2.2.5. Kazety reaktoru LR-0

Kazety jsou šestibokého typu a ve dvou možných provedeních a to podle modelových reaktorů:

VVER 1000 – Zkrácený model bezobálkové kazety o výšce 1/3 standardní kazety (3,5 m v JE Temelíně) a skládající se z nosného rámu (obsahujícího jednu hlavní tyč a 18ti vodících tyčí s různým počtem distančních mřížek). V tomto rámu je pak vloženo 312 palivových proutků. Vodící trubky se používají pro vedení absorpčních prvků klastrů. V ose kazety je umístěna trubka určená k umístění měřících přístrojů pro vnitroreaktorová měření, např. tlaku, teploty, toku neutronů). Výška aktivní části je 1,25 m a palivové proutky složené ze slitiny zirkonu jsou plněny tabletami z oxidu uraničitého (UO_2).

VVER 440 – je kazeta podobná předchozímu typu, obsahuje však méně palivových proutků, 126. Také postrádá vodící kanálky pro absorpční klastry a její obal je tvořen z hliníkového plechu. [4]

2.2.2.6. Absorpční klastry reaktoru LR-0

Tyto klastry se používají k řízení procesů v reaktoru a jsou složeny z 18 proutků naplněných absorbatorem. Těmito proutky se pohybuje pomocí elektromotorů z velína.

I když se jako absorbátor může používat bór, v tomto případě je použit B_4C (karbid boru). Část klastrů je během provozu úplně zvednuta a v případě nutnosti slouží k havarijnímu zastavení procesů v reaktoru v případě nutnosti. Zbylé klastry jsou experimentální a používají se podle potřeb měření. Nejčastěji je při běhu reaktoru využito 6 – 15 klastrů z maximálního možného počtu použitých 85 klastrů. [4]

2.2.2.7. Spouštěcí zařízení reaktoru LR-0

Štěpná reakce v reaktoru se startuje *vstříknutím* neutronů do aktivní zóny reaktoru, aby mohla začít jaderná reakce. Pro vytvoření těchto počátečních neutronů se používá zdroj typu $^{241}AmBe$ s výkonem $6,6 \cdot 10^6$ neutronů za sekundu. Je umístěn pod nádobou reaktoru a před spuštěním reaktoru se do něj vsune a po nastartování reakce se opět vysune a dále se procesu štěpné reakce neúčastní. [4]

2.2.2.8. Princip jaderných reaktorů

Štěpná reakce v reaktoru je založena na bázi štěpení těžkých prvků, například ^{235}U , ^{233}U , ^{239}Pu , kdy uran ^{235}U je materiál, který se nemusí vyrábět uměle a je tedy nejčastějším používaným štěpným materiálem. Díky jeho malému podílu v uranové rudě se tato musí nejprve obohatit. To se provádí odstraňováním izotopu ^{238}U až na obohacení přibližně 4%.

Štěpení uranu je dosaženo zásahem neutronu do jádra uranu, což uvolní energii přibližně 200 MeV. Tomu odpovídá energie 2 MWh při rozštěpení 1 gramu ^{235}U . Díky vyhořívání paliva je však tato hodnota podstatně nižší.

Při štěpení však nevzniká pouze energie, ale také i další neutrony, obvykle 2 až 3, které se mohou dále účastnit řetězové štěpné reakce. Tyto neutrony vzniklé při štěpení mají po svém vzniku příliš vysokou energii (a tedy i rychlost) na to, aby se mohly účastnit štěpné reakce musí se tato nejprve snížit, aby neunikly z aktivní oblasti dříve, než zasáhnou další jádra štěpného materiálu. Tohoto zpomalení se dosahuje moderátorem v aktivní zóně, který má za úkol snížit rychlost nově vzniklých neutronů na požadovanou hodnotu.

Existují i tzv. rychlé reaktory, které dokáží pracovat i s rychlými neutrony, jejich řízení je ovšem složitější, na druhou stranu efektivita spalování paliva je vyšší. [4]

2.2.2.9. Experimentální smyčky

Jedná se o technologické okruhy modelující chování a podmínky v aktivní zóně reaktoru a chladících okruzích. S jejich pomocí je možné provádět simulaci a pozorování mechanických, tepelně-hydraulických, materiálových či korozních výzkumů za hodnot odpovídajících provozu reaktoru. Umístěním do reaktoru LVR-15 je možné rozšířit pozorované jevy o účinky odpovídajícího záření. [5]

3. Teoretická část

3.1. Fluence částic

Kolem zdrojů ionizujícího záření existuje určité pole záření, jež je charakterizováno fluencí částic nebo fotonů (hustotou prošlých částic nebo fotonů) Φ . Je to podíl částic dN , které dopadly v daném bodě prostoru na kouli s plochou hlavního řezu dA , a této plochy:

$$\Phi = \frac{dN}{dA} [m^{-2}] \quad (3.1)$$

Příkon fluence částic ϕ (někde nazývaný hustota toku částic) je pak roven přírůstku fluence za jednotku času:

$$\phi = \frac{d\Phi}{dt} [m^{-2} s^{-1}] \quad (3.2)$$

Nejčastěji se měření příkonu fluence neutronů používá ke zjištění stavu reaktoru. Nejvyšší hodnoty ϕ bývají zpravidla uprostřed aktivní zóny reaktoru. [6]

3.2. Metody měření fluence neutronů

Jelikož jsou neutrony částice elektricky neutrální, jsou nazývány nepřímo ionizujícími částicemi. Pro jejich detekci se využívá efektů vznikajících až při následných reakcích neutronů s určitými materiály.

3.2.1. Plynové detektory

Tyto detektory jsou schopné poskytovat naměřené hodnoty v podstatě okamžitě a jejich princip je založen na reakci záření procházejícího náplní detektoru, která se skládá z ionizovatelného plynu. Ionizující záření při průchodu komorou detektoru elektricky nabije částice plynu a vytvoří tak volné nosiče náboje, které jsou následně vlivem elektrického pole v detektoru urychleny na anodu a katodu. Detekovaný elektrický impulz je následně zpracován a vyhodnocen. [7]

3.2.2. Štěpné detektory

Jedná se o detektory postavené na podobném principu jako detektory plynové, avšak neutrony zde nereagují s plynem, nýbrž s uranem nebo transurany, které se po dopadu neutronů štěpí. Produkty tohoto štěpení jsou detekovány a vyhodnocovány. Nejčastěji má tento detektor tvar trubky se štěpným materiálem na její vnitřní stěně je pa katoda a s anodou umístěnou uprostřed. [7]

3.2.3. Aktivační analýza

Jedná se o jednu z často používaných metod detekce, kdy do míst v reaktoru určených dle potřeby jsou umístěny aktivační fólie z vhodného materiálu, např. ze zlata, india, niklu aj. Na tyto fólie pak dopadají neutrony a materiál, ze kterého jsou fólie vyrobeny, se různými jadernými reakcemi aktivuje.

Takto aktivované folie se poté analyzují a určuje se jejich aktivita. V případě zářičů gama se aktivovaný materiál měří na gama-spektrometrech. Detektor tohoto spektrometru je umístěn ve stíněné komoře, aby se zamezilo vlivu záření pozadí (prostředí). Při analýze daného vzorku se musí vzít v úvahu několik faktorů, například kdy bylo ozařování ukončeno a kdy bylo zahájeno měření aktivované fólie. Podle toho se poté upravují naměřené hodnoty, jelikož je třeba vzít v úvahu poločas rozpadu radioaktivního materiálu.

3.2.4. Poproutkové měření – gama skenování ozářených palivových proutků

Poproutkové skenování se využívá ke zjištění rozdělení hustoty štěpení v objemu aktivní zóny reaktoru. Ozářené palivové proutky se po vyjmutí z aktivní zóny proměřují jednotlivě na gama-spektrometrickém zařízení. Touto metodou lze stanovit jak radiální tak axiální rozložení fluenčního příkonu neutronů v aktivní zóně reaktoru. K určení axiálního rozložení se měří aktivita vybraných radionuklidů po délce proutku, ke zjištění radiálního rozložení se měří proutky vždy v jedné pozici, která odpovídá vybrané radiální ploše aktivní zóny.

Gama-skenovací zařízení na LR-0 se skládá z:

- elektromechanického zařízení řízeného počítačovým programem, který zajišťuje axiální pohyb proutku.
- Gama-spektrometrického měřicího zařízení s polovodičovým HPGe detektorem.
- řídicího počítače.

Celkový pohled na skenovací zařízení je v Příloze, Obr. P1.2. [8]

3.2.4.1. Nosné zařízení proutků

Skládá se z nosných sloupů, ke kterým je upevněný elektromotor. Tento pak pohání vodící tyč se šroubovicí, ke které je připojena nosná plocha. Na ploše je zavěšen palivový proutek. Pohyb tyče se šroubovicí je motorem ovládán speciálním zařízením přes počítačový program, proto je možné přesně nastavit polohu proutku pro skenování (s přesností ± 1 mm). Krabice s řídicí deskou ovládacího zařízení je vyobrazena v Příloze 1, Obr. P1.3. [9]

3.2.4.2. Palivový proutek

Jedná se o dutou trubku o délce 125 cm, jejíž průměr je 9,15 mm. Plášť o síle 0,81 mm vyrobeného ze slitiny zirkonu, niobu a hafnia v koncentracích: 98,97 % Zr, 1,00 % Nb a 0,03 % Hf. Nákres palivového proutku je v Příloze 1, Obr. P1.2. [8]

3.2.4.3. Stínění

Stínění detektoru skenovacího zařízení se skládá ze čtvercového jádra z olova s obdélníkovým průřezem. Toto jádro je pak vloženo do několika válcových olověných vrstev uzavřených v železném opláštění. Stínění má za účel propustit k detektoru pouze gama záření z přesně definované části skenovaného proutku a zamezit ovlivnění výsledků měření zářením z pozadí. Na přední stěně stínění je umístěn duralový prvek o síle 2 mm slouží k udržení proutku ve stanovené poloze.

Výřez v centrálním bloku stínění slouží také jako kolimátor, který umožňuje přesněji nastavit z jakého směru a pod jakými úhly mohou fotony dopadat na detektor. Náčrt stínění je v Příloze 1, Obr. P1.4 [8]

3.2.4.4. Detektor

Detektory záření gama jsou založeny na principu reakcí záření gama, tedy fotonu, s materiálem detektoru. Jedny z nejpoužívanějších materiálů jsou germanium (Ge) a křemík (Si) pro polovodičové detektory a krystal NaI(Tl) pro detektory scintilační.

V případě CVŘ se jedná o polovodičový germaniový koaxiální detektor HPGe fy Ortec, typu n-p. Jeho foto a technické parametry jsou uvedeny v Příloze 1, Obr. P1.5.

Pro úplnost se ještě zmíním o další části gama-spektrometrické trasy - mnohokanálovém analyzátoru (MCA). Jeho funkcí je upravit proudové impulzy z předzesilovače detektoru, dále zesílit jejich amplitudu a roztřídit je do příslušných kanálů podle energie interagujícího fotonu. Pro gama-skenující měření se na LR-0 používá MCA DSA2000 fy Canberra.

3.3. Radioaktivita a štěpení uranu

3.3.1. Radioaktivita

Pod pojmem radioaktivita rozumíme vyzařování ionizujících částic z jader nestabilních atomů při jejich (postupné) přeměně na jiné nuklidy. Tato radioaktivní přeměna má statistický charakter.

Na radioaktivitu prvků můžeme nahlížet z pohledu jejich aktivity, kdy se určuje kolik atomů se přemění za jednotku času. Její jednotka se jmenuje *becquerel* [Bq] a definujeme ji podle následujícího vztahu:

$$A = \frac{dN}{dt} [\text{Bq}] . \quad (3.3)$$

kde A je aktivita, dN je množství jader, která se přemění za čas dt .

Jednotlivé radioaktivní prvky se rozpadají s různou rychlostí, kterou lze vyjádřit pomocí tzv. rozpadové konstanty a lze poté spočítat kolik radioaktivního materiálu zůstane z původního množství za určitý čas následujícím vztahem:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} . \quad (3.4)$$

kde $N(t)$ označuje počet zbývajících radioaktivních jader po uplynutí určité doby, N_0 označuje původní množství radioaktivních jader, t označuje uplynulý čas a λ je rozpadová konstanta. Znázornění počtu rozpadlých jader je zobrazeno v Příloze 1 viz Obr. P1.7

Často se pracuje s pojmem *poločas rozpadu*. Jedná se o dobu, za kterou se rozpadne polovina původního počtu radioaktivních jader. Označuje se jako $T_{1/2}$. Dosazením do vztahu (3.4) dostaneme:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} . \quad (3.5)$$

Po úpravě vztahu (3.5) dostáváme

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} [s] . \quad (3.6)$$

Jednotlivé radioaktivní přeměny, se však mohou lišit způsobem jakým probíhají a rozdělujeme je podle toho, jaké záření při nich vzniká. Nejčastěji se jedná o záření α , β a γ .

Záření α je takový druh záření, kde přeměna jádra radioaktivního prvku je provázena vyzářením héliového jádra, tedy 2 protony a 2 neutrony. Toto záření se považuje za nejméně „tvrdé“ záření, je nejpomalejší a nejhůře proniká ostatními materiály, ale na druhou stranu má největší ionizující účinky.

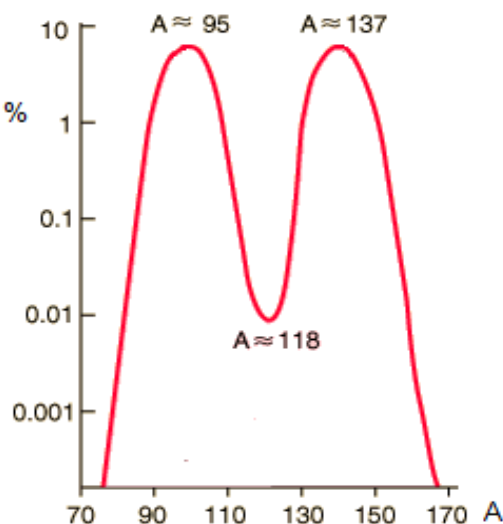
Pod zářením β se rozumí vyletování nabitých elektronů z jádra přeměňujícího se prvku. Záření β může např. zastavit vrstva vzduchu silná 1 m (platí pro určité energie záření β). Toto záření je rychlejší než předchozí a snáze proniká ostatními materiály.

Záření γ tvoří fotony o vysokých energetických hodnotách nad 10keV. Díky své energii a malé velikosti částic je toto záření „tvrdší“ než záření předešlá, s největší prostupností jinými materiály. [10]

3.3.2. Štěpení uranu

Pokud jádro uranu zasáhne neutron o určité energii, změní se v tomto jádře vazební energie a celé jádro uranu se rozštěpí na dvě menší jádra jiných prvků a uvolní se dva až tři neutrony. Tyto neutrony se pak mohou účastnit dalších srážek a zapříčinit následné štěpení uranových jader ve vzniklé řetězové reakci.

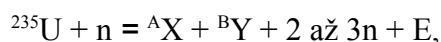
V reaktorových podmínkách jsou však tyto neutrony vzniklé štěpením jader uranu příliš rychlé a je potřeba jejich rychlost (a tedy energii) snížit, aby z oblasti štěpení neunikly dříve, než kolidují s dalšími jádry uranu. Toho se v reaktorech dosahuje pomocí moderátorů, které mají za úkol rychlé neutrony zpomalit. Používají se prvky s velkým účinným průřezem pro záchyt neutronů.



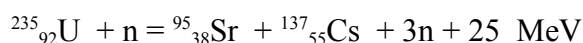
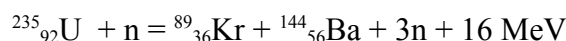
Obr. 1: Procentuální zastoupení štěpných trosek ^{235}U

Nově vzniklé atomy z atomu původního štěpného materiálu jsou různě velké. To ukazuje např. zjednodušený graf procentuálního zastoupení prvků po štěpné reakci na ^{235}U (Obr. 1). Z grafu je vidět, že nejčastěji vznikají jádra s nukleonovými čísly kolem $A=95$ a $A=130$.

Štěpnou reakci uranu ^{235}U lze obecně popsat následujícím způsobem:

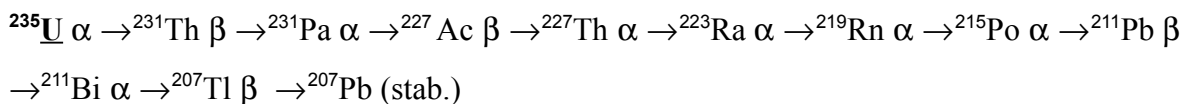
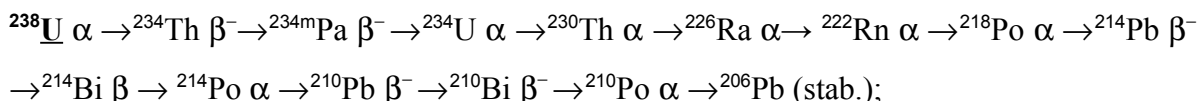


a tedy pro jednu konkrétní možnost štěpných produktů např.:



^{238}U se štěpí převážně rychlými neutrony (avšak mají malý účinný průřez), zatímco ^{235}U se štěpí pomalými neutrony. Ve světě i u nás je většinou používáno jaderné palivo s obohaceným uranem, což znamená, že zatímco v přírodní směsi uranu je cca 99,3% ^{238}U a 0,7% ^{235}U , v obohaceném je cca 2-4% ^{235}U a štěpení probíhá pomalými neutrony.

Pro úplnost uvádím rozpadové řady samovolného rozpadu ^{238}U a ^{235}U [11]:



3.4. Interakce záření gama a elektronů s hmotou

V následující části se zabýváme pouze interakcí záření gama s hmotou, neboť tato práce je zaměřena na spektrometrii záření gama. Při těchto interakcích vznikají nabitě elektrony, které jsou schopné dále ionizovat.

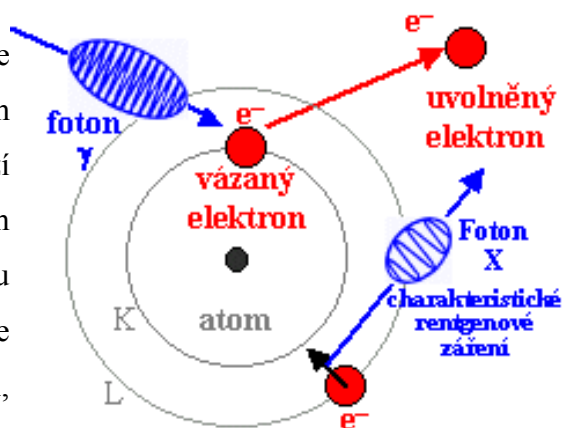
Při procházení fotonů gama záření hmotou může docházet převážně ke třem jevům: fotoelektrickému jevu (fotoefektu), Comptonově efektu (rozptylu) a k tvorbě páru elektron-positron. Energie fotonu procházejícího hmotou (konkrétně detektorem a stíněním) určuje, která z těchto interakcí nastane s největší pravděpodobností. U nižších hladin energií je fotoelektrický jev více častým a pravděpodobnost jeho vzniku klesá se vzrůstající energií procházejícího fotonu. Tvorba párů se naopak projevuje až při energiích vyšších než 1,02 MeV. Tyto tři jevy se vyskytují v následujícím pořadí vzhledem ke vzrůstající energii fotonu: fotoefekt, Comptonův rozptyl a tvorba párů. [12]

3.4.1. Fotoefekt

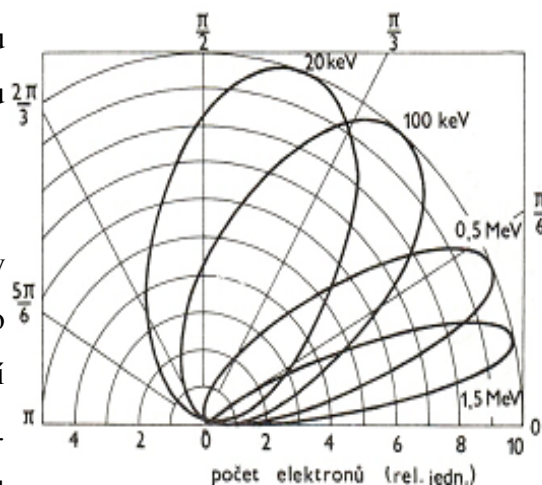
Tento efekt nastává, pokud dojde ke srážce mezi fotonem a elektronem v atomovém obalu materiálu, kterým záření gama prochází a zpravidla se jedná o elektron na nejnižším orbitalu. Tento dopadající foton zanikne a svou energii přitom předá elektronu, se kterým se srazil. Tento elektron pak opouští atomový obal, viz. Obr. 2 a Obr. 3. Energie vyraženého elektronu se rovná energii, kterou mu předal foton zmenšenou o tzv. vazební energii, kterou byl uvolněný elektron vázán v atomovém obalu atomu. Toto se dá vyjádřit vztahem:

$$E_k = E_\gamma - E_v \quad (3.7)$$

Jelikož se tímto uvolnilo místo v nejnižším orbitalu pro jeden elektron, nahradí ho jiný elektron z orbitalu vyššího, který má vyšší energii, než jakou by měl mít na nižší dráze. Jejich rozdíl se vyzáří v podobě nového fotonu charakteristického rentgenového záření. [12]



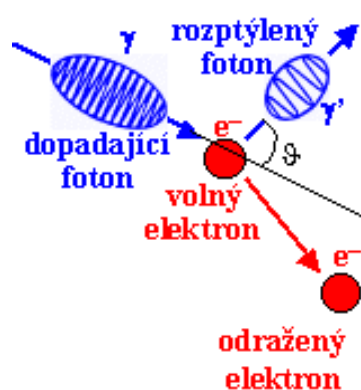
Obr. 2: Fotoefekt [12]



Obr. 3: Úhlové rozložení uvolněných elektronů [13]

3.4.2. Comptonův jev

Za předpokladu, že se foton prostupujícího záření gama srazí s volným nebo slabě vázaným elektronem, viz. Obr. 4, (energie tohoto fotonu značně přesahuje vazební energii elektronu v atomovém obalu), pak tento elektron získá pouze část energie fotonu. Tato srážka by se dala přirovnat srážce kulečnickových koulí (pružná srážka). Odražený foton se pak se sníženou energií pohybuje z místa srážky pod jiným úhlem než foton dopadající, viz Obr. 5 a Obr. 6. Ze zákonů zachování energie a hybnosti lze pak využít následující vztah pro výpočet nové energie fotonu záření gama:

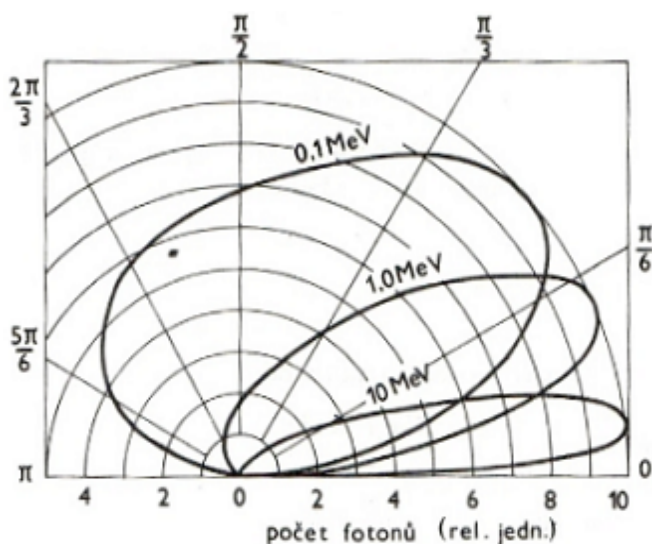


Obr. 4: Comptonův rozptyl [12]

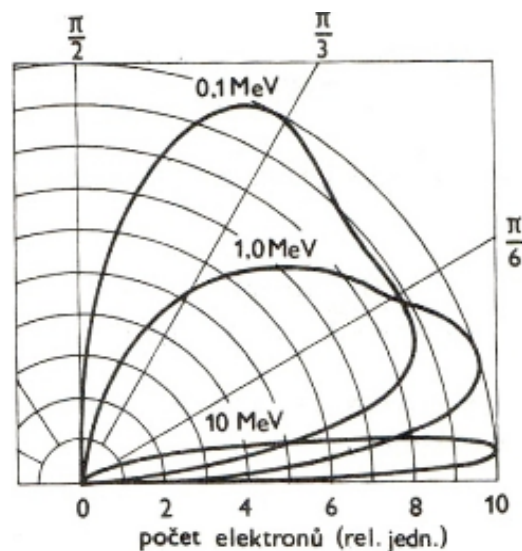
$$E_{\gamma'} = E_{\gamma} / \left[1 + \left(\frac{E_{\gamma}}{m_{oe}c^2} (1 - \cos \vartheta) \right) \right] \quad (3.7)$$

kde m_{oe} označuje hmotnost elektronu v klidovém stavu (tzv. klidová hmotnost), $E_{\gamma'}$ je energie odraženého fotonu, E_{γ} je rovna původní energii fotonu, c označuje rychlost světla ve vakuu a ϑ se rovná úhlu, pod kterým se foton odrazil.

Energie zasaženého elektronu se pak zvětší o rozdíl mezi energiemi dopadajícího a odraženého fotonu. [12]



Obr. 6: Úhlové rozložení rozptýlených fotonů [13]



Obr. 5: Úhlové rozložení odražených elektronů [13]

3.4.3. Tvorba párů

Tvorbou párů se rozumí současný vznik dvojice částic, záporně nabitého elektronu e^- a kladně nabitého pozitronu e^+ , jako důsledek interakce fotonu gama v poli jádra, viz. Obr. 7.

Vztah $E=mc^2$ pak můžeme využít k výpočtu minimální nutné energie fotonu pro vytvoření páru elektron-pozitron. Ta je rovna součtu klidových hmotností elektronu a pozitronu:

$$m_{0e^-} = m_{0e^+} = 9,1093898 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

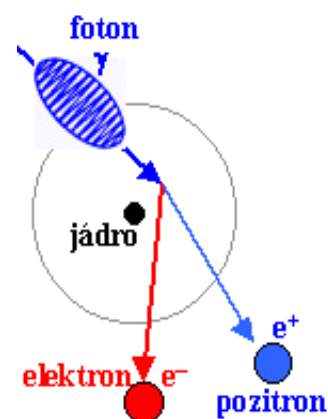
$$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$1\text{eV} = 1,60217733 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$E_{\gamma}' = 9,1093898 \cdot 10^{-31} \cdot (2,99792458 \cdot 10^8)^2$$

$$E_{\gamma}' = 8,18711168 \cdot 10^{-14} \text{ J} = 510999,0645 \text{ eV}$$

$$E_{\gamma, \text{min}} = 2 \cdot E_{\gamma}' = 2 \cdot 0,511 \text{ MeV} = 1,02 \text{ MeV}$$



Obr. 7: Tvorba párů [12]

Uvolněný elektron se pak může účastnit dalších reakcí, například přenosu náboje, zatímco pozitron může zaniknout v anihilaci po srážce s elektronem za vzniku dvou nových fotonů, kdy každý z nich má energii 0,511 MeV a směr jejich pohybu je navzájem opačný. Tyto nově vzniklé fotony o nižší energii již nemohou způsobit další tvorbu párů, avšak mohou se podílet na fotoelektrickém jevu. [12]

3.4.4. Interakce ionizujících elektronů

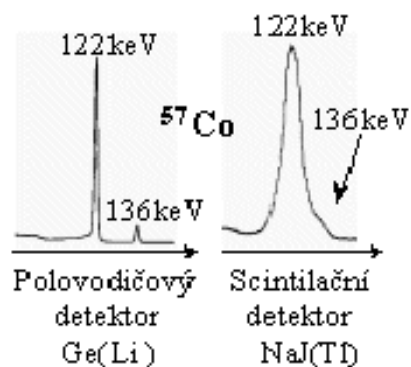
Elektron interaguje s elektronovým obalem atomů látky, kterou prochází. Tyto síly jsou odpuzivé a mohou způsobit vytlačení/vyražení elektronů z atomového obalu jádra a tím ionizaci atomu. Při těchto interakcích mění elektrony svůj směr díky své hybnosti srovnatelné s hybností elektronů v atomovém obalu, proto jsou jimi snáze ovlivněny (dráha je „klikatá“). Při odrazech od elektronových obalů se daný elektron zbrzdí a jeho dráha se určuje podle efektivního doletu R_{90} , který označuje vzdálenost, po které je 90 % původní energie elektronu předáno materiálu. Energie takového elektronu se postupně sníží až na 0,04 eV při pokojové teplotě, pokud není do té doby zachycen nějakým atomem. Zároveň také tímto poklesem energie elektron ztrácí schopnost ionizovat ostatní atomy. Při průchodu elektronu látkou mohou vznikat různé druhy tzv. sekundárního záření: Čerenkovovo záření (částice se pohybuje rychleji než světlo v daném prostředí), brzdné záření-X (spojité spektrum) a charakteristické záření-X (specifické pro každou danou látku). [12]

3.5. Spektrometrie záření gama s HPGe-detektorem

Jedná se o zpracování informací o záření gama pomocí detektoru a příslušného elektronického zařízení a výpočetní techniky. Pod spektrometrií chápeme nejen měření počtu dopadajících fotonů, ale i jejich energie. Spektra zářičů gama se znázorňují například grafy, kdy na vodorovnou osu nanášíme energii dopadajícího záření a na svislou osu četnost. Ve spektru jsou energetické linky (píky), které jsou charakteristické pro daný zářič. Jejich plocha (integrál plochy pod křivkou píky) udává intenzitu naměřeného záření.

3.5.1. HPGe detektor

Jedná se o polovodičový detektor, jehož základem je krystal germania o vysoké čistotě (HPGe = High Purity Germanium). Oproti scintilačním detektorům, založených na krystalech NaI(Tl), mají polovodičové detektory větší rozlišovací schopnost, protože nároky na energii pro vytvoření iontových párů jsou asi 100x menší než u NaI(Tl) detektorů, viz. Obr. 8. Krystaly germania o vysoké čistotě se pak používají z důvodů rušivých vlivů, které by do naměřených hodnot zanesly příměsi. Na rozdíl od germaniových detektorů driftovaných lithiem Ge(Li), které je třeba stále chladit na teplotu kapalného dusíku, HPGe detektory je nutné chladit jen za provozu.



Obr. 8: Porovnání šířky píků spektra detektorů Ge(Li) a NaI(Tl) [14]

HPGe detektory pracují na principu ionizace probíhající v krystalu detektoru. Zapojením krystalu jako diody konstrukce PIN (mezi materiály s vodivostí P a N je tzv. intrinzní polovodič - minimálně dotovaný) v závěrném směru jsou veškeré volné nosiče nábojů z její oblasti odčerpány. Tímto vznikne ochuzená vrstva, kterou lze použít pro detekci dopadajících fotonů záření gama. Na Obr. P1.6 v Příloze 1 je příklad řezu koaxiálním typem HPGe detektoru typu n-p, který je například používán v CV Řež.

Elektrony, uvolněné při interakci záření gama v krystalu detektoru (Ge), jsou urychleny v elektrickém poli zavedeném do polovodičového materiálu detektoru. Výsledkem je elektrický impuls, který je nadále zpracován v předzesilovači a následně zesilovači na signál, který je lépe zpracovatelný. Tento signál pak prochází skrze A/D převodník, kde se převede z analogového signálu na číslicový kód, který je následně možné zpracovat, např. ve vícekanálovém spektrálním analyzátoru, nebo v počítači vybaveném příslušným softwarem. [14] [15]

3.5.2. Energetické rozlišení detektoru

Jedná se o poměrný rozdíl energie dvou částic dopadajících na detektor, které od sebe detektor ještě dokáže rozlišit. Ve spektru se tento rozdíl projevuje jako vzdálenost mezi dvěma sousedními píky, které lze rozlišit. Tato energie se buď udává v absolutních hodnotách v keV, nebo v relativních hodnotách jako pološířka píku FWHM (Full Width Half Maximum). FWHM udává šířku píku v polovině maxima, energetické rozlišení detektoru pro danou úroveň energie je tedy tím lepší, čím je hodnota FWHM pro tuto energii menší. Hodnota FWHM není stejná pro všechny píky celého spektra. [14] [15]

3.5.3. Časové rozlišení detektoru

Jedná se o čas, který musí uběhnout, aby detektor a vyhodnocovací zařízení dokázali zpracovat informaci o dopadající částici a vyhodnotit energetickou odezvu, kterou tato dopadající částice v detektoru vyvolá. [14] [15]

3.5.4. Mrtvá doba detektoru

Jedná se o časový úsek, kdy detektor neregistruje dopadající fotony. Určuje se od doby dopadu fotonu do detektoru a jeho registrace. Napřed musí foton integrovat s materiálem detektoru, následně se musí zaregistrovat a zpracovat výsledné impulsy. Detektor není během této doby schopen zaznamenat žádné další impulsy a fotony, které dopadnou na detektor, se nepromítnou do naměřeného spektra. Podle toho, jak se mrtvé doby projevují, je můžeme rozdělit na dvě skupiny: kumulativní a nekumulativní mrtvé doby. [14]

3.5.5. Sumační píky

V případě měření zdrojů záření, které vyzařují fotony s více než jednou energií, může se stát, že do detektoru dopadnou dva fotony o různých energiích E_{γ_1} a E_{γ_2} s minimální časovou prodlevou, nebo naráz. Detektor pak může zpracovat oba dva fotony současně a jejich odezva se sečte. Výsledkem tudíž bude registrace pouze jednoho, většího, impulsu. V naměřeném spektru se pak vytvoří tzv. sumační pík, jeho velikost pak odpovídá součtu energií E_{γ_1} a E_{γ_2} .

Tento součtový efekt se rozděluje na tzv. pravé (korelované) sumace, pocházející ze stejné přeměny jádra, a nepravé (falešné, nekorelované) sumace, které nejsou ze stejné přeměny. Sumace způsobují systematické chyby v určení aktivit zářičů, a proto je třeba provést korekci aktivit na tento nepříznivý jev. [14] [15]

Např. fy Canberra nabízí PC program, který řeší problém pravých sumací. Do tohoto programu je třeba vytvořit vstupní data pro danou geometrii gama-spektrometrického měření, což je náplní této práce.

Další možností, která eliminuje korigování koincidencí, je přímý výpočet účinnosti detekce záření metodou MCNP (Monte Carlo N-Particle Transport Code, což je počítačový program pro simulaci jaderných procesů).

3.5.6. Energetická kalibrace detektoru

Jedná se o přiřazení energií jednotlivým kanálům mnohakanálového analyzátoru. Obvykle se používá lineární závislost vycházející ve tvaru:

$$E_{\gamma} = a_0 + konst. \cdot (\text{číslo kanálu}) , \quad (3.8)$$

kde energie fotonů gama E_{γ} a konstanta a_0 se obvykle uvádí v jednotkách keV.

Pro stanovení přímky energetické kalibrace se používají tzv. etalony, vzorky známých radionuklidů, jejichž energie záření gama pokrývá potřebný energetický rozsah (^{241}Am , ^{152}Eu , ^{60}Co , ^{137}Cs apod.). [15]

3.5.7. Účinnostní kalibrace

Účinnost je míra, s jakou detektor zaznamenává jednotlivé energetické úrovně kvant dopadajícího záření gama. Pro nízké energie je tato účinnost nízká, neboť fotony s tak nízkou energií se často ani nemusí dostat do detekční oblasti germaniového krystalu v detektoru. Proto zprvu tato detekční účinnost roste se vzrůstajícími energiemi dopadajících fotonů, při maximální účinnosti pro energie obvykle kolem 100 keV. Pro vyšší energie dopadajících fotonů naopak zase detekční účinnost klesá, neboť fotony s příliš velkou energií opustí detekční prostor dříve, než dojde k fotoefektu.

Účinnostní detekce závisí na různých faktorech, z nichž důležitá je konstrukce detektoru a geometrie měření radioaktivního vzorku.

Pro obvyklé určení účinnostní kalibrace je potřeba použít několik vzorků, etalonů se známými energiemi záření gama a známými aktivitami. Při účinnostní kalibraci je obvykle třeba provést různé korekce (např. korekci na pravé sumace). [15]

4. Praktická část

4.1. Program Genie 2000 a jeho moduly pro kalibraci

Na LR-0 se k analýze spekter gama záření palivových proutků používá program Genie 2000 a jeho moduly fy Canberra [16].

Genie 2000 je ucelená sada programů umožňujících získání a analyzování spektra z multikanálového analyzátoru (dále jen MCA). Jeho funkce zahrnují ovládání MCA, zobrazení a manipulace s naměřeným spektrem, základní analýzu spektra a výpis výsledků. Volitelné funkce zahrnují komplexní analýzu spektra záření alfa a gama, zajištění jakosti, automatizaci a klíčové balíčky pro specifické vyhrazené aplikace.

Patentované algoritmy na korekci pravých sumací (Cascade Summing Correction) fy Canberra, zahrnuté v softwaru Genie 2000, umožňují přesnější určení aktivit radionuklidů, které vykazují efekty pravé sumace, např.: ^{60}Co , ^{88}Y a ^{152}Eu .

Korekce na pravé sumace při účinnostní kalibraci spektra záření gama lze v tomto programu provádět dvěma způsoby:

1. V modulu *Geometry Composer* se vytvoří popis geometrie sestavy detektor (s případným stíněním) – vzorek, ve které byl analyzovaný vzorek (zdroj záření gama) měřen. Soubor s tímto popisem je posléze použit programem *Genie* a zpracován modulem *Gamma Acquisition and Analysis* při provedení účinnostní kalibrace. Navíc je třeba provést tzv. Peak-to-Total (P/T) kalibraci. Ta se provádí za pomoci radionuklidů, které nemají efekt pravých sumací, jako např. ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{113}Sn , ^{137}Cs , ^{54}Mn , ^{65}Zn . Soubor s kalibrací P/T je také použit programem *Genie 2000* při provádění účinnostní kalibrace.
2. Využije se modulu *ISOCS* nebo *LABSOCS*, pomocí kterých lze účinnostní kalibraci v programu *Genie* provést bez nutnosti měřit P/T kalibraci. Není tedy nutné pořizovat sadu radionuklidů jako v bodě 1 (jsou relativně drahé a navíc se lze vyhnout manipulaci s radioaktivními zářiči, z nichž některé mají relativně krátký poločas rozpadu). Je však třeba mít firmou Canberra vytvořený datový soubor s tzv. charakterizací detektoru. Uživatel pak vytvoří popis geometrie vzorku a kolimátoru (stínění detektoru) v programu *Geometry Composer* a tento datový soubor, v němž je zahrnuta také charakterizace detektoru, pak *Genie 2000* využívá při účinnostní kalibraci.

4.2. Programový modul Geometry Composer

Jedná se o modul v programu Genie určený k modelování různých geometrií měřících sestav vzorek – detektor [17].

Obsahem tohoto programu je soubor šablon, které se používají pro geometrii vzorku, pro stínění či kolimátory detektorů a pro detektor. Program umožňuje importovat vlastní soubor s definicí používaného detektoru. Program *Geometry Composer* také nabízí materiálovou knihovnu, ze které si můžeme vybrat velké množství materiálů, které se v našem měření vyskytují nebo můžeme další materiály doplnit.

Obecný postup při vytváření nové geometrie a její použití při vytváření kalibrační křivky korigované na pravé sumace je uveden v Příloze 2.1.

V tomto programu jsem vytvářel datový soubor pro konkrétní měřící sestavu a to palivový proutek – detektor HPGe ve stínění s kolimátorem.

Vývojový diagram rámcově zobrazující práci s programem *Geometry Composer* pracuje je v Příloze 2 na Obr. P2.3, Obr. P2.4 a Obr. P2.5.

4.2.1. Ovládání programu

Hlavní menu programu se skládá z klasické nabídky voleb **File** (Soubor), **Edit** (Úpravy), **View** (Zobrazit) a **Help** (Nápověda).

Volba **File** nabízí možnosti zahájení nového projektu, uložení projektu stávajícího a nebo otevření již existujícího projektu. Rovněž je přítomna volba pro tisk.

Volba **Edit** umožňuje změnit nastavení rozměrů již implementovaného radioaktivního vzorku (Dimensions), detektoru, kolimátoru a stínění, dále umožňuje nastavit uživatelské prostředí a vytvořit si vlastní dodatky do knihovny materiálů.

Volba **View** se zabývá především možnostmi nastavení náhledu na geometrii měření a její podporu například zapnutím mřížek, drátového modelu, os a podobně.

Pod tímto menu (**File** až **Help**) se nachází několik sad ikon, které slouží jako zkratky téměř ke všem volbám jinak umístěných v kontextovém menu.

4.2.2. Postup při vytváření nové geometrie

Při vytváření nové nebo úpravě stávající geometrie je nabídnut seznam předem vytvořených šablon různých základních tvarů, například trubky nebo krabice. Kromě základních geometrií vzorků jsou k dispozici ještě tzv. komplexní modely, které jsou např. zastoupeny trubkou s několikaúrovňovou výplní a několikanásobným opláštěním.

U každé šablony vzorku je k dispozici také nákres, který uživateli umožní se snáze orientovat v tom, jaké rozměry patří k jaké části vzorku. Program je nastaven tak, že není možné vytvořit radioaktivní vzorky s neslučitelnými hodnotami, např. není možné nastavit některé rozměry jako nulové nebo záporné.

Při nastavování vzorku je také k dispozici knihovna materiálů, neboť se musí vždy určit, z jakého materiálu je jaká část vzorku a jakou má relativní radioaktivitu. Tu lze např. použít k definici směsí, kdy každá její složka má jinou aktivitu a vyzařuje s jinou intenzitou.

V této sekci se také nastavuje poloha detektoru vůči vzorku, jeho vzdálenost v osových souřadnicích, jeho natočení vůči vzorku, jak podél os celého měření tak podél vlastních os a možnost zamířit detektor mimo vlastní vzorek.

V dalších odstavcích se podrobněji zabývám jednotlivými možnostmi, které jsou v programu *Geometry Composer* k dispozici.

4.2.3. Kolimátor (Collimator)

U kolimátorů je možné také, kromě rozměrů a použitého materiálu, vybraného z materiálové knihovny, nastavit hodnotu označovanou jako CRPN (Collimator Reference Point Number - Počet referenčních bodů kolimátoru). Tato hodnota se používá k určení počtu tras fotonů záření gama, který se má při výpočtech korekční křivky použít. Následující vztah nám ukazuje, jak se tento počet tras N zjistí:

$$N = 2^{CRPN-1} \quad (4.1)$$

Ze vztahu (4.1) vyplývá, že CRPN musí být alespoň 2 a maximálně 10. Pokud se nenastaví na žádnou hodnotu a ponechá se nula, bude se ve výpočtech uvažovat o automatické hodnotě CRPN = 4. Také je nutno dodat, že hodnota CRPN se při výpočtech účinnostní korekční křivky projeví pouze při použití kolimátoru. Čím je hodnota CRPN vyšší, tím více budou výpočty korekční křivky složitější a potrvají delší dobu.

Pro potřeby měření v CVŘ byly vytvořeny 3 modely stínění, lišící se výškou štěrbiny (podle varianty vloženého kolimátoru). Šířka štěrbiny kolimátorů byla vždy 1 cm, zatímco jejich výška byla 2 cm, 3 cm nebo 5 cm.

4.2.3.1. Standardní kolimátor (Standard collimator template)

Tato volba funguje podobně jako u nového vzorku, včetně zobrazení nákresu a přiřazení souřadnic odpovídajícím rozměrům. Zde se také nastavuje poloha kolimátoru vůči detektoru, nikoli vůči vzorku. Proto je nutné při zadávání souřadnic detektoru počítat i s prostorem pro kolimátor.

Mezi standardní nabízené tvary patří válcový (s kruhovým průřezem) a kvádrový

kolimátor (s obdélníkovým průřezem), kde válcový kolimátor má vlastní štěrbinu pouze ve tvaru kuželu a kvádrový kolimátor má možnost mít štěrbinu pouze ve tvaru jehlanu.

Podobně jako u nového vzorku i v tomto případě je k dispozici náčrty v menu šablony, který určuje, jaké rozměry patří jaké části kolimátoru. Také je k dispozici interaktivní model kolimátoru, zobrazující námi prováděné úpravy v reálném čase. V této části se také nastavuje, jak hluboko bude detektor v kolimátoru zasunut.

4.2.3.2. Pokročilý kolimátor (*Advanced collimator template*)

Pokud by nepostačovaly standardní šablony, je možnost k výpočtu korekční křivky účinnostní kalibrace využít pokročilých šablon kolimátorů, které jsou popsány v dokumentaci programu. Jedná se např. o pokročilý kolimátor složený ze spojení kruhového a obdélníkového profilu s několikanásobným vrstvením materiálů, kolimátor s kruhovým průřezem a štěrbinou ve tvaru šestiúhelníku s několikanásobným vrstvením materiálu atd.

Tyto pokročilé modely však nejsou ve vlastním grafickém prostředí *Geometry Composer* k dispozici a je tedy nutné jejich konstrukční údaje psát ručně do speciálního textového souboru, následně ručně upravit soubor s geometrií vzorku a poté ručně zadat příkaz ke generování korekční křivky účinnostní kalibrace.

Soubory pro ruční popis kolimátoru se nacházejí ve složce kořenového disku GENIE2K/isocs/data/PARAMETERS a jsou uloženy v odpovídajících souborech. Např. data pokročilého kolimátoru válcového typu jsou v souboru *ac_collimator.txt* a do souboru s geometrií se importuje vepsáním příslušného řádku do souboru s geometrií s příponou *.gis*, která se automaticky generuje ze souborů *.geo* při uložení práce v programu *Geometry Composer*. Např. *~Rcollimator=Kolimator* zajistí použití kolimátoru s názvem Kolimator (bez diakritiky) ze souboru *r_collimator.txt*. Provázání názvů souborů kolimátorů a jejich klíčových slov zajišťuje soubor *SPACE.INI*, nalézající se v adresáři *GENIE2K/isocs/data*.

4.2.4. Podvodní opláštění (*Underwater housing*)

Program též nabízí využití podvodního vodotěsného opláštění, které obepíná celý detektor i s kolimátorem. Toto opláštění však může být pouze kruhového průřezu tvořící dutý válec, u kterého lze nastavit pouze materiál a sílu stěn.

4.2.5. Absorbátory

Dále existuje možnost nastavit v programu přítomnost max. dvou absorbátorových vrstev mezi vzorkem (zdrojem záření) a stíněním (kolimátorem). U absorbátorů se nastavují pouze dva parametry: tloušťka absorbátorové vrstvy a druh použitého materiál.

4.2.6. Generování bodů pro účinnostní kalibrační křivku

Pomocí volby **Edit** → **Efficiency Curve** → **Generate data points** se nechají vygenerovat data pro účinnostní korekční křivku. Tyto se generují na základě vytvořené geometrie a podle vlastností námi použitých, případně námi definovaných, materiálů. Soubor s vygenerovanými daty se automaticky ukládá na stejné místo, jako se ukládají soubory s geometrií.

Tato data se generují pro různé úrovně hladin, které lze zobrazit, popř. upravit, pomocí volby **Edit** → **Efficiency Curve** → **Parameters**. Pokud byla nabídka energií a přípustných chyb nevyhovující, lze tak vytvořit zcela novou sadu energií a přípustných chyb, která se může uložit do adresáře GENIE2K/isocs/data/ENERGY_LIST.

Tyto data vygenerovaná pro použití účinnostní korekční křivky se pak používají při kalibraci v programu *Gamma Acquisition & Analysis*.

4.2.7. Materiálová knihovna (Material library)

Pomocí volby **Edit** → **Material library**, nebo příslušného tlačítka na liště, lze manipulovat s knihovnou materiálů, které se používají v sestavované geometrii měření. Vlastní okno materiálové knihovny je rozdělené do tří částí.

Část vpravo obsahuje seznam již vytvořených materiálů a jejich směsí. Šipka doleva, umístěná v horní části, umožňuje použití již hotového materiálu z knihovny a nastavení procentuálního zastoupení tohoto materiálu ve výsledné směsi. Šipka doprava v dolní části pak slouží k přidání výsledné směsi.

Levá část obrazovky materiálové knihovny slouží ke skládání materiálů z jednotlivých prvků, výběr prvků se provádí v dolní oblasti této části. Hned nad ní se nastavuje početní zastoupení prvku v chemickém vzorci, např. vodu lze složit jako 2H a 1O. K nastavení této četnosti slouží políčko označené jako n=. V uvedeném příkladě by pak výsledný chemický vzorec vypadal takto: $_H_2O$. Šipkou nahoru se pak přidává vybraný prvek, včetně jeho četnosti, do výpisu užitých prvků. Šipkou doprava v horní oblasti této části se přidává výsledná směs prvků do okna složení materiálu. Při tom lze nastavit procentuální zastoupení dané směsi ve výsledném materiálu. Toto se dá kombinovat s materiály již vytvořenými.

Ve střední části materiálové knihovny se pak v horní oblasti nalézá okno s výpisem složení námi vytvářeného materiálu. Pod tímto oknem je kontrolní výpis zastoupených prvků ve vytvořeném materiálu. Musíme také nastavit hustotu vytvářeného materiálu, jeho unikátní jméno a popis.

Při vytváření materiálové knihovny je třeba mít na paměti, že samotný radioaktivní materiál se většinou nachází v jeho nosiči pouze v nepatrném zastoupení, i když vyzařuje silně. Do materiálové knihovny se však zadává procentuální zastoupení jednotlivých materiálových složek a výsledná hustota směsi, proto lze v některých případech vlastnosti samotného zářiče pominout (například hmotnost a hustotu stroncia ve vzorku zamořené půdy, atp.).

4.3. Vytvoření modelů geometrie pro gama-skenování

Program obsahuje omezené množství šablon různých geometrií. V případě, že modelovaná geometrie nemá přesně tvar některé ze šablon, je třeba ji aproximovat co nejpřesněji pomocí kombinace programových šablon.

Náčrt palivového proutku je vyobrazen v příloze 1 na Obr. P1.2 a vytvoření jeho modelu je popsáno v odst. 4.3.1. Odstavec 4.3.2. se zabývá tvorbou tablety s cesiem a odstavec 4.3.3. popisuje tvorbu modelů etalonů typu EG.

Na obrázcích Obr. P2.6 a Obr. P2.7 je nakresleno reálné stínění. Při vytváření tohoto modelu jsem provedl několik aproximací, které jsou popsány v odstavci 4.3.4. Celý kolimátor je pak vytvořen jako jednodílný kus ve tvaru kvádrů opsaného původnímu tvaru.

4.3.1. Palivový proutek naplněný UO_2 a s jedinou tabletou UO_2

Palivový proutek sám o sobě je příliš dlouhý na to, aby se při jeho pohybu dostaly jeho krajní části do měřicí oblasti, proto bylo přistoupeno k modelování palivového proutku jako by se jednalo o jednoduchý válec, kterému se definuje tloušťka stěn proutku na 0,75 mm, průměr 7,53 mm a výška radioaktivního materiálu je 1250 mm. Úchyty, zátky atd. jsou tedy z modelu vypuštěny.

Při modelování geometrie tablety oxidu uraničitého (UO_2) byl použit stejný postup jako u palivového proutku s UO_2 . Pouze výška válce byla zvolena na 9,66 mm, takže měřený zdroj byl vždy menší, než výška štěrbin kolimátoru. [18]

Tabulka 1: Složení palivového proutků

Paliv. Proutek Složení	Hustota [g/cm ³]
Zr – 98,97 %	6,44
Nb – 1,00 %	
Hf – 0,03 %	

4.3.2. Tableta s CS_2O

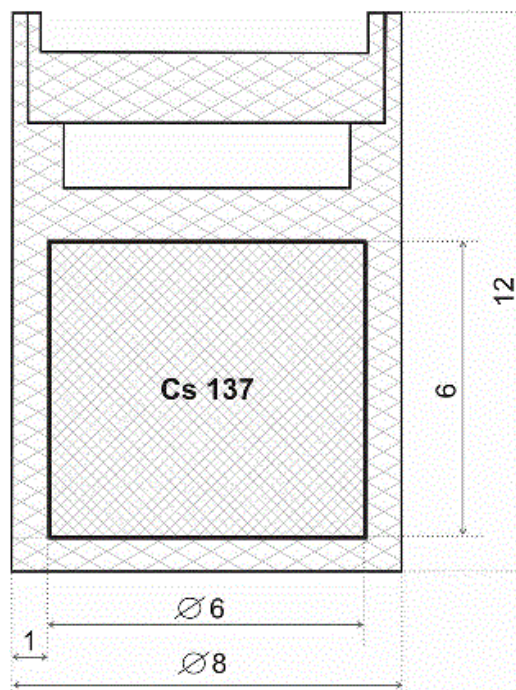
Při modelování tablety cesia se muselo opět přistoupit k aproximaci, jelikož je tableta cesia viz. Obr. 9 (s rozměry v mm) o něco větší, než tableta uranu a nevejde se tedy do palivového proutku. Z tohoto důvodu byla pro její umístění zvolena duralová trubka. Samotné cesium v tabletě je rovnoměrně rozptýlené v porézní keramické směsi, která je uzavřena v ocelové kapsli. [18]

Jelikož k modelování tohoto zářiče byly k dispozici jen 2 vrstvy a protože má dural poměrně nízkou hustotu, byla jeho vrstva nahrazena zesílením vrstvy ocele o 0,35 mm.

Jako materiál zářiče byla použita hlavně keramika o složení $\text{SiO}_2 \cdot 4\text{Al}_2\text{O}_3$ s hustotou $1,18 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, jelikož hmotnostní zastoupení Cs_2O je nepatrné. Pro co nejpřesnější zadání materiálu bylo přistoupeno na hmotnostní zastoupení v míře 99,9999 % keramiky a 0,0001 % Cs_2O .

Tabulka 2: Materiálové složení Cs tablety a ocelové kapsle [18]

Materiál	Složení	Hustota [g/cm ³]
Keramika	$\text{SiO}_2 \cdot 4\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cs}_2\text{O}$	1,18
Ocel 321	Fe - 67,645%	7,9
	Cr - 18%	
	Ni - 10,8%	
	Mn - 2%	
	Si - 1%	
	Ti - 0,4%	
	C - 0,08%	
	P - 0,045%	
S - 0,03%		



Obr. 9: Cs tableta v ocelové kapsli [18]

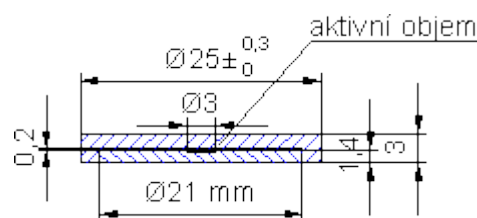
4.3.3. Etalony typu EG

Pro modelování etalonu zářiče v provedení EG byly opět provedeny úpravy tvaru zářiče.

Zářič byl vhodným způsobem rozpuštěn v odpovídajícím roztoku a poté nanesen na filtrační papír. Po odpaření roztoku je filtrační papír, chovající se nyní jako zářič, uzavřen v polystyrénovém pouzdře.

Aktivita zářiče a tvar pouzdra poté určuje o jaký typ etalonu jde. Rozměry, tvar a vzhled viz Obr. 10 a Obr. 11. [19]

Tento případ byl modelován jako kruhová plocha z důvodu vyhovujících možností nastavení počtu vrstev a natočení vůči detektoru. Rozměry modelu byly upraveny na průměr zářiče, 3 mm, jelikož použitý model nenabízí dostatek možností a i kvůli vlastním rozměrům zářiče vůči kolimátoru.



Obr. 10: Rozměry etalonu typu EG3. [19]



Obr. 11: Vzhled etalonu typu EG. [19]

4.3.4. Stínění

4.3.4.1. Tvar stínění

Aby byl přesně zachován tvar štěrbiny kolimátoru, přistoupilo se k nahrazení kruhového průřezu stíněním s opsaným čtvercovým průřezem. Z rozboru vyplynulo, že se touto aproximací bude zavedena do vyhodnocování pouze zanedbatelné chyby z hlediska účinnostní kalibrace – viz příloha, kapitola 8.2.3.

4.3.4.2. Počet vrstev a tloušťka stínění

Jelikož máme na výběr z předem definovaných tvarů kolimátorů a ty mají omezený počet vrstev a možnosti jejich tvarování, bylo nutné zjednodušit v modelu tvar reálného stínění. Zjednodušení bylo potřeba provést tak, aby vzniklé chyby měly zanedbatelný dopad.

Dalším zjednodušením byl 0,5 mm velký rozdíl mezi vlastním výřezem kolimátoru a dalším stupněm stínění (úprava č. II vrstev 1 a 2 na Obr. P2.10). Tento lze zanedbat zarovnáním vrstvy 1 na délku vrstvy 2 a tím ušetřit nutnost přidání jedné vrstvy navíc. Stejně tak se zarovná délka třetí vrstvy stínění na délku vrstvy čtvrté. (opět úprava č. II na Obr. P2.10)

Třetí aproximací bylo nahrazení železného pláště obepínajícího stínění o síle 3 mm. Tuto vrstvu již nebylo možné přidat do modelu stínění, a proto byl její vliv na průchod fotonů přibližně nahrazen mírným zvětšením tloušťky vnější olověné vrstvy č. 4 (úprava č. III na Obr. P2.10). Míra tohoto zesílení byla odhadnuta na základě porovnání součinitelů lineárního zeslabení μ . Tento koeficient udává, v jaké míře se zeslabuje intenzita záření o určité energii pro daný materiál, a to podle vztahu:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu d}, \quad (4.2)$$

kde I_0 je původní intenzita záření, I je intenzita po průchodu vrstvou materiálu o síle d , μ je lineární koeficient zeslabení daného materiálu (Tabulka 11).

Výchozí předpoklad je, že záření se chová jako úzký svazek, který je dobře kolimovaný. Pokud by se jednalo o nekolimovaný, tzv. široký svazek, vztah (4.2) by musel být upravený pomocí koeficientu B (vzrůstový build-up faktor), který je dán empiricky.

Porovnáním hodnot koeficientů μ pro energie od 0,5 MeV do 2 MeV pro olovo a železo vychází, že poměr těchto koeficientů není lineární při postupně vzrůstajících energiích fotonů a má přibližně exponenciálně klesající tendenci od 2,50x po 1,54x. Podrobnější rozbor je uveden v příloze 2, kapitola 8.2.4. Na základě úvah o rozsahu měřených energií záření gama bylo místo 3 mm tlusté železné opláštění použita 1,7 mm silná vrstva na olověném stínění (tedy místo tloušťky 77 mm je výsledná tloušťka 78,7 mm).

Čtvrtá aproximace byla provedena na přední stěně stínění. Jednalo se o obdobný problém jako u třetí aproximace. Jelikož se železné stínění nachází i na přední stěně kolimátoru, bylo přikročeno i zde k nahrazení 3 mm železa za 1,7 mm olova. Jelikož se model geometrie stínění chová jako jednolitý kus, úprava čelní stěny přinesla i změnu úhlu výřezu vlastního otvoru (štěrbiny) kolimátoru (viz spojení vrstev 1 a 2, úprava č. II a IV na Obr. P2.10).

Na základě rozboru geometrie (příloha, kapitola 8.2.5.) této vrstvy a úvah obdobných úvahám při druhé aproximaci a opětovným posouzením koeficientů zeslabení s přihlédnutím k faktu, že železné opláštění nepokrývá celou přední stranu stínění, bylo použito 1,5 mm olova na nahrazení čelní části železného opláštění (úprava č. IV na Obr. P2.10). Tato aproximace ovlivní měření naplněného palivového proutku.

Nahrazení železného materiálu na vnější straně stínění (úprava č. III a IV na Obr. P2.10) nemá prakticky významnější vliv na zdroje záření, které jsou menší nebo rovny velikosti štěrby. V případě zdrojů záření řešených v této práci se jedná o EG etalony a tablety cesia a uranu umístěných uprostřed štěrby. Vliv se tedy nejvíce projeví v případě měření palivového proutku.

4.4. Provázání Geometry Composer a Gamma Acquisition & Analysis

Účinnostní kalibraci s korekcí na pravé sumace pro danou geometrii lze vytvořit dvěma způsoby, a to pomocí souborů .gis, nebo souboru .ecc.

Vlastní získání naměřeného spektra záření gama probíhá v programu *Gamma Acquisition & Analysis*. V tomto programu se provádí jak vlastní získávání naměřených hodnot, tak i následné vyhodnocení získaného spektra gama záření. Chceme-li, v tomto programu můžeme využít křivku účinnostní kalibrace vygenerovanou v programu *Geometry Composer*, nebo využít přímo soubor geometrie vytvořené také v tomto programu.

Vlastní soubor účinnostní kalibrace s příponou .ecc (*Geometry Composer* se může pustit přímo z GAA) se použije přes menu **Calibrate** → **Efficiency** → **By ISOCS/LabSOCS**, kde se pak vybere příslušný soubor. Dále následuje nastavení řádu polynomu křivky (ve volbě **Show**), která se prokládá kalibračními body. Pomocí volby **List Pks** lze zkontrolovat odchylku takto upravené křivky od kalibračních bodů. Volba **Cross-over** slouží pro složení korekční křivky ze dvou částí, předěl těchto částí (konec jedné křivky a její napojení na křivku druhou) se většinou volí mezi prudce rostoucí a klesající částí křivky původní (tvořené pouze jednou rovnicí).

Kalibrační software *ISOCS model S573* je instalován jako součást programového vybavení balíčku *GENIE 2000* a je využíván ve spojení s programem *Geometry Composer* pro vypočítávání účinnostní křivky s korekcí na pravé sumace. Toho je dosaženo formou nabídky typů kolimátorů a modelů radioaktivních zářičů (např. jednoduchý válec, komplexní válec, „bedna“, koule, trubka atd.). Které ze šablon jsou k dispozici určuje to, jaký typ softwaru se použije, jestli ISOCS nebo LabSOCS. Daný software má pak pro nabídnuté šablony již připravené výpočetní postupy na bázi výpočetní metody Monte Carlo, které poté aplikuje při výpočtech účinnostní korekční křivky.

5. Výsledky

Pro testování vytvořených modelů byla využita již naměřená spektra záření gama různých radioaktivních vzorků v různých geometriích. Byly porovnány aktivity vypočtené programem Genie2000 na základě vytvořených modelů (účinnostní kalibrace korigovaná na efekt pravých sumací) s certifikovanými hodnotami aktivit (EG, Cs-tableta) nebo s aktivitami vypočtenými programem Genie2000 na základě účinnostní kalibrace bez korekce na efekt pravých sumací (U-tableta, palivový proutek).

Pro lepší přehlednost byla výsledná data uspořádána do tabulek, kdy jako první budou uvedeny tabulky pro měření na etalonech typu EG (tabulky 3 a 4), následují tabulky měření tablety cesia a tablety UO₂ (tabulky 5 a 6) a měření palivového proutku s UO₂ (tabulka 8). Tato měření proběhla ve dvou variantách, podle toho, jak velká štěrbina kolimátoru byla při měření použita. K vyhodnocení výsledků naměřených spekter zářičů EG byly použity hodnoty aktivit jednotlivých nuklidů tak, jak jsou uvedena na certifikátech od dodavatele [19]. Vypočtené aktivity radionuklidů byly vztaženy ke stejnému datu jako aktivity certifikované.

Poznámky k tabulkám 3 – 8: *Nuklid ID* značí identifikovaný a srovnávaný nuklid ve vyhodnocovaném spektru; *Aktivita* daného nuklidu je uvedena ve zvolených jednotkách (např. kBq), *Nejistota* přísluší odhadu hodnoty aktivity, o kolik se může skutečná hodnota lišit od té vyhodnocené. Poslední dva sloupce v následujícím pořadí uvádějí aktivitu daného nuklidu udávanou dodavatelem na certifikátu etalonu a odchylku naměřené aktivity od této hodnoty na certifikátu.

5.1. Tabulky a zhodnocení jednotlivých měření

5.1.1. Etalony EG3 – 3 cm štěrbina kolimátoru

Tabulka 3: Srovnání vypočtených aktivit s certifikovanými hodnotami různých radionuklidů etalonů EG3 - 3 cm štěrbina kolimátoru

EG3 – 3 cm Název spektra	Nuklid ID	Aktivita [kBq]	Nejistota [kBq]	Cert. Hodnota [kBq]	Odchylka od cert. [%]
SP01_Am	Am-241	511,87	5,98	471,50	8,56
SP02_Co	Co-60	223,20	1,75	216,70	3,00
SP03_Cs	Cs-137	348,46	3,70	333,50	4,49
SP04_Eu	Eu-152	446,11	3,08	420,90	5,99

5.1.2. Etalony EG3 – 2 cm štěrba kolimátoru

Tabulka 4: Srovnání vypočtených aktivit s certifikovanými hodnotami různých radionuklidů etalonů EG3 - 2 cm štěrba kolimátoru

EG3 – 2 cm Název spektra	Nuklid ID	Aktivita [kBq]	Nejistota [kBq]	Cert. Hodnota [kBq]	Odchylka od cert. [%]
SP05_Am	Am-241	487,90	5,40	471,50	3,49
SP06_Ba	Ba-133	96,52	2,36	85,85	12,43
SP07_Co	Co-60	225,85	1,68	216,70	4,22
SP08_Cs	Cs-137	356,55	3,75	333,50	6,91
SP09_Eu	Eu-152	443,79	2,46	420,90	5,44
SP10_Y	Y-88	241,70	2,47	232,20	4,09
SP11_Y	Y-88	239,78	2,50	232,20	3,26
SP12_Eu	Eu-152	445,73	2,75	420,90	5,90
SP13_Co	Co-60	227,02	1,71	216,70	4,76
SP14_Mix	Co-60	128,47	0,95	123,00	4,45
	Ba-133	159,40	3,89	139,40	14,35
	Cs-137	142,14	1,52	130,60	8,83
SP15_Mix	Co-60	127,74	0,91	123,00	3,85
	Ba-133	158,39	3,83	139,40	13,62
	Cs-137	140,56	1,46	130,60	7,63
SP16_Mix	Co-60	128,86	0,96	123,00	4,77
	Ba-133	158,71	3,87	139,40	13,85
	Cs-137	140,29	1,51	130,60	7,42
SP17_Mix	Co-60	128,45	0,96	123,00	4,43
	Ba-133	156,56	3,83	139,40	12,31
	Cs-137	140,30	1,51	130,60	7,42

Jak je z výsledků vidět, odchylky od uvedených hodnot na certifikátech se liší v rozmezí od 3,49 % po 14,35 %. Nejmenší odchylky jsou většinou u izotopu kobaltu Co-60 (6 hodnot) a naopak největší odchylky vždy vycházejí pro izotop baria Ba-133 (5 hodnot). Jedním z důvodů může být velikost energií gama záření: u Co-60 jsou relativně vysoké (1173 a 1333 keV), zatímco u Ba-133 jsou spíše nižší (v rozsahu 53 až 384 keV).

5.1.3. Tableta cesia

Tabulka 5: Srovnání vypočtených korigovaných a nekorigovaných aktivit césiové tablety s certifikovanou hodnotou aktivity 870 kBq ± 1,5%.

Cs Tableta 870 kBq Název spektra	Nuklid ID	ISOCS - s korekcí		Odchylka od certif. [%]	Bez korekce		Odchylka od certif. [%]
		Aktivita [kBq]	Nejistota [kBq]		Aktivita [kBq]	Nejistota [kBq]	
SP18_Cs_tabl	Cs-137	864,18	9,01	-0,67	700,58	3,90	-19,47
SP19_Cs_tabl	Cs-137	875,28	9,13	0,61	711,06	3,95	-18,27
SP20_Cs_tabl	Cs-137	841,31	9,01	-3,30	683,49	4,15	-21,44
SP21_Cs_tabl	Cs-137	840,59	9,00	-3,38	682,90	4,15	-21,51
SP22_Cs_tabl	Cs-137	845,43	8,95	-2,82	686,85	4,03	-21,05

Z uvedených hodnot v tabulce 5 je vidět, že odchylky měření v tomto případě jsou minimálně 0,67 % a maximálně 3,38 % od hodnoty udávané na certifikátu od výrobce. Jak je vidět, výsledky pro Cs-137 v případě tablety mají menší odchylky od certifikátu, než výsledné hodnoty při použití geometrie etalonu typu EG3.

5.1.4. Uranová tableta

Protože při vyhodnocování tohoto případu není možné porovnávat naměřené aktivity s certifikáty nebo podobnými údaji, bylo přistoupeno k porovnání hodnot vypočítaných programem *Gamma Acquisition & Analysis* bez použití korekce na pravé sumace a s výsledky vypočítanými na základě použití testovaných modelů vypracovaných v modulu *Geometry Composer*. Výsledky jsou uvedeny v tabulkách 6 a 7.

Tabulka 6: Srovnání aktivit vybraných radionuklidů v tabletě UO_2 pro kolimátor 2 cm.

UO ₂ – Tableta Štěrbina 2 cm Název spektra	Nuklid ID	ISOCS		EG bez korekce		Odchylka [%]
		Aktivita [kBq]	Nejistota [kBq]	Aktivita [kBq]	Nejistota [kBq]	
SP23_U_tabl	Sr-92	12,64	1,46	9,43	1,09	34,09
	Zr-97	6,68	0,71	4,19	0,45	59,26
	I-134	26,19	0,41	17,27	0,27	51,67
SP24_U_tabl	Sr-92	19,05	0,99	14,29	0,73	33,30
	Zr-97	11,86	0,53	7,45	0,33	59,31
	I-134	40,91	0,85	25,89	0,51	57,99

Jak je z výsledků vidět, aktivity vybraných radionuklidů se při použití korekcí na pravé sumace značně liší od hodnot, které program vypočítá bez použití korekce na pravé sumace. Tyto rozdíly se pohybují u vybraných radionuklidů od 33,3 % po 59,31 %.

Pro porovnání je uvedena tabulka, jak by vycházely hodnoty aktivit vypočtené programem, při použití kolimátoru se štěrbinou 3 cm a jejich rozdíl oproti hodnotám při použití štěrbinu veliké 2 cm.

Tabulka 7: Srovnání hodnot aktivit pro štěrbinu 2 cm a 3 cm

UO ₂ – Tableta Štěrbina 3 cm Název spektra	Nuklid ID	ISOCS – 3 cm		ISOCS – 2 cm		Odchylka Od 2 cm [%]
		Aktivita [kBq]	Nejistota [kBq]	Aktivita [kBq]	Nejistota [kBq]	
SP25_U_tabl	Sr-92	18,59	0,97	19,05	0,99	-2,39
	Zr-97	11,55	0,52	11,86	0,53	-2,64
	I-134	39,83	0,26	40,91	0,85	-2,62

5.1.5. Měření palivového proutku UO_2

Pro vyhodnocení aktivit radionuklidů v palivovém proutku bylo přistoupeno ke stejnému opatření jako u vyhodnocení aktivit v případě tablety UO_2 , porovnání vypočtených aktivit vzhledem k hodnotám vypočtených bez použití korekce na pravé sumace. Při vyhodnocování dat získaných měřeními bez použití korekce na pravé sumace se také musela použít horší kvalita pro identifikaci píků na měřeném spektru, neboť program je nebyl na daném spektru schopný identifikovat, na rozdíl od spektra upraveného o korekci na pravé sumace pomocí geometrie modelu vytvořeném v *Geometry Composer*.

Tabulka 8: Měření aktivit vybraných radionuklidů v palivovém proutku s UO_2 .

U palivový proutek Název spektra	Nuklid ID	ISOCS		EG bez korekce		Odchylka [%]
		Aktivita [kBq]	Nejistota [kBq]	Aktivita [kBq]	Nejistota [kBq]	
SP26_U_proutek kratší ozáření	I-134	61,58	5,30	0,95	0,08	6411,85
	Cs-138	77,50	6,26	1,36	0,10	5617,94
SP27_U_proutek delší ozáření	Ra-226	15432,13	1244,69	24,32	1,75	63352,58
	Ba-140	1818,46	106,75	4,11	0,97	44124,33
	La-140	2181,50	50,67	24,46	0,36	8552,78

Tabulka 9 pak uvádí rozdíl mezi hodnotami vypočtených aktivit pro modely z programu *Geometry Composer*, kdy hodnoty „Bez aproximace“ jsou vypočítány pro stínění ve své zjednodušené formě, se zanedbaným železným opláštěním atp. a hodnoty „S aproximací“ jsou vypočtené při použití modelu aproximovaného stínění (nahrazení železného opláštění vrstvami olova).

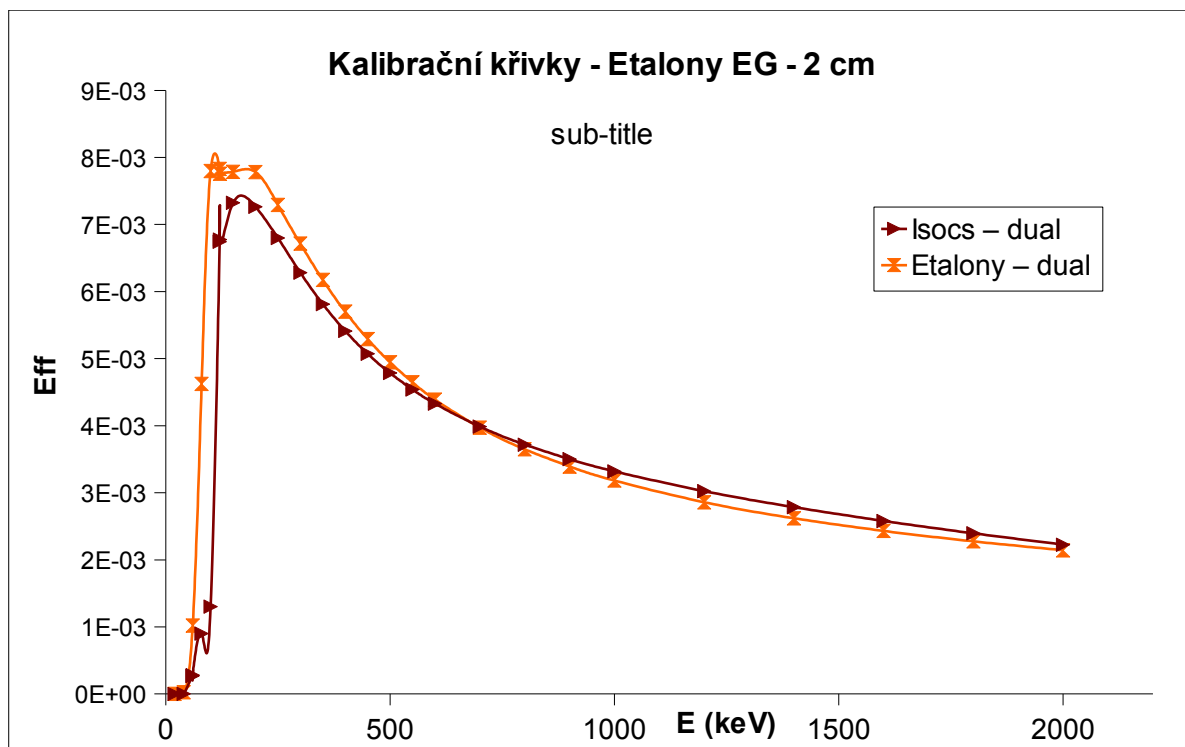
Tabulka 9: Tabulka porovnání výpočtů s a bez aproximace stínění

Název spektra	Nuklid ID	S aproximací		Bez aproximace		Rozdíl [%]
		Aktivita [kBq]	Nejistota [kBq]	Aktivita [kBq]	Nejistota [kBq]	
SP17_Mix	Co-60	128,45	0,96	128,89	3,66	0,34
	Ba-133	156,56	3,83	157,68	4,76	0,72
	Cs-137	140,30	1,51	139,91	5,62	0,28
SP02_Co	Co-60	223,20	1,75	223,77	6,37	0,26
SP03_Cs	Cs-137	348,46	3,70	347,53	13,96	0,27
SP18_Cs_tabl	Cs-137	864,18	9,01	866,21	3,70	0,23
SP19_Cs_tabl	Cs-137	875,28	9,13	879,13	3,76	0,44
SP23_U_tabl	Sr-92	12,64	1,46	9,43	1,09	34,09
	Zr-97	6,68	0,71	4,19	0,45	59,26
	I-134	26,19	0,41	17,27	0,27	51,67

5.2. Grafy účinnostních korekčních křivek a jejich srovnání

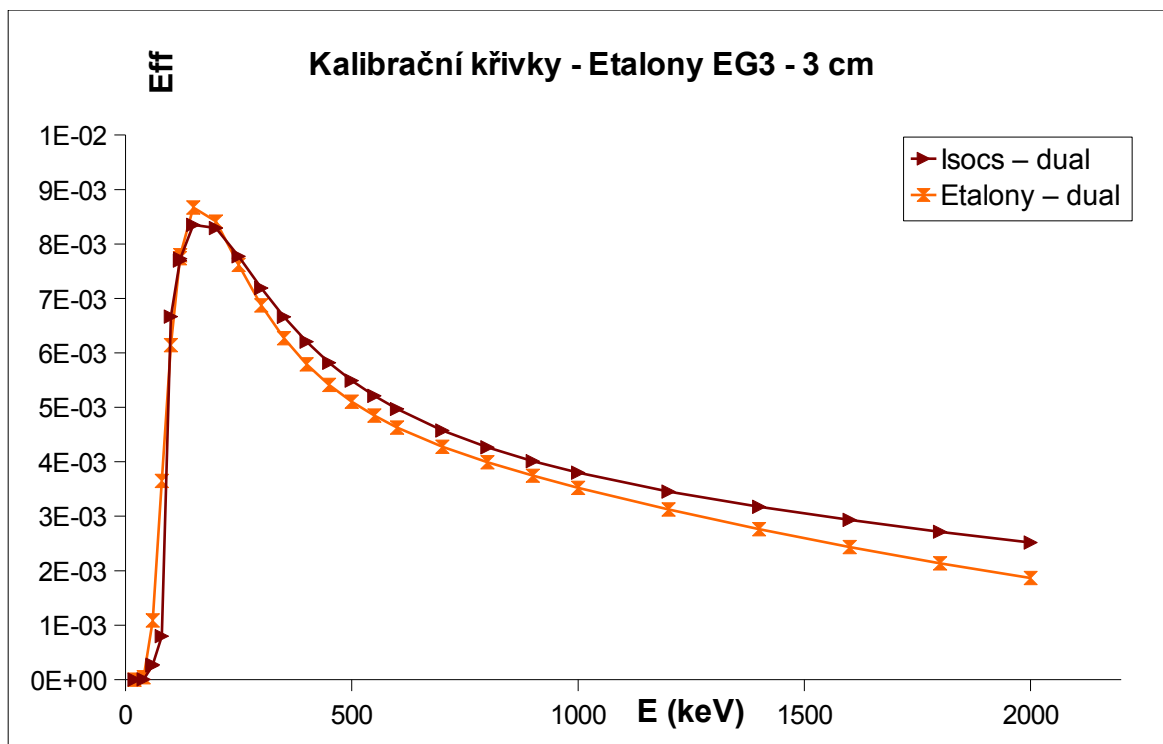
V následující sekci je uvedeno několik grafů, zobrazujících rozdíl mezi kalibračními křivkami vypočítanými bez korekce na pravé sumace, vytvořenými na základě měření etalonů EG (křivky označené jako Etalony), a křivkami s korekcí na pravé sumace vypočtenými metodou ISOCS (označené ISOCS). Varianty křivek dual a empirical označují, jakým způsobem byla daná křivka vytvořená v programu *Genie*. K vytvoření křivky s dodatkem empirical bylo použito pouze jedné rovnice, zatímco na vytvoření křivek označených jako dual byly použity rovnice dvě, první popisuje „náběžnou“ část křivky a druhá rovnice část klesající.

5.2.1. Měření na etalonech EG3 – 2 cm štěrbinou



Graf 1: Porovnání kalibračních křivek pro etalony EG3 se štěrbinou kolimátoru 2 cm

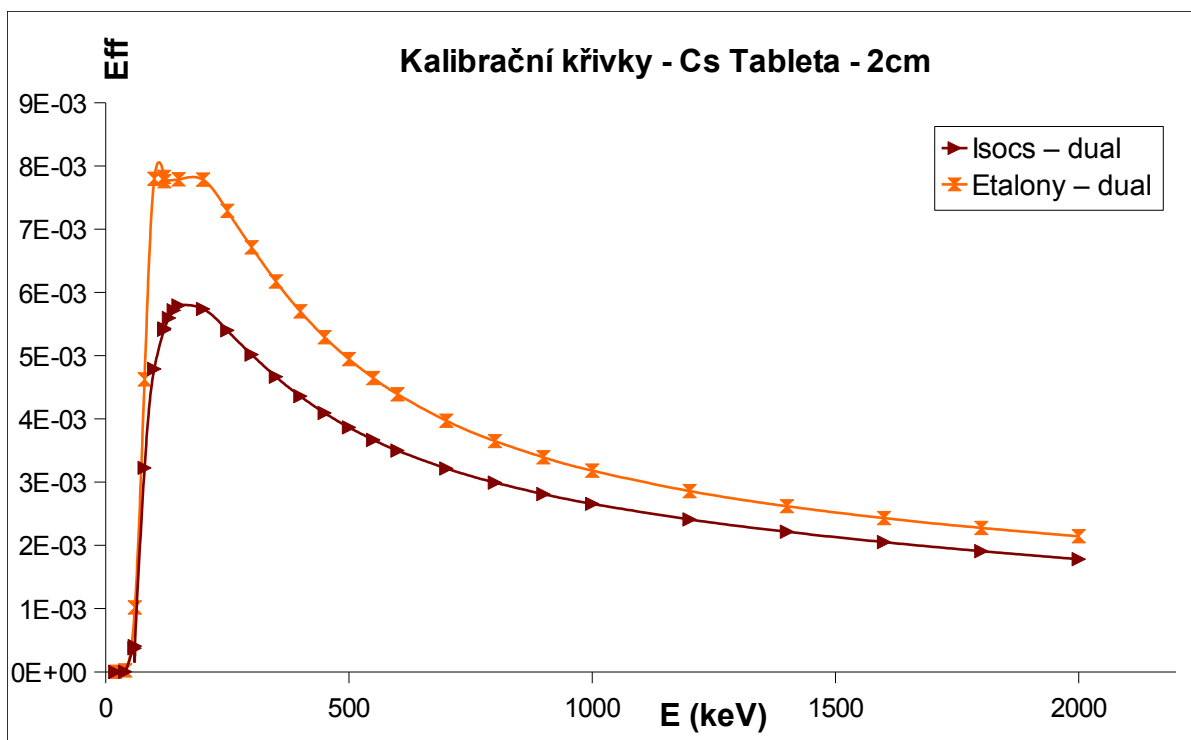
5.2.2. Měření na etalonech EG3 – 3 cm štěrbinou



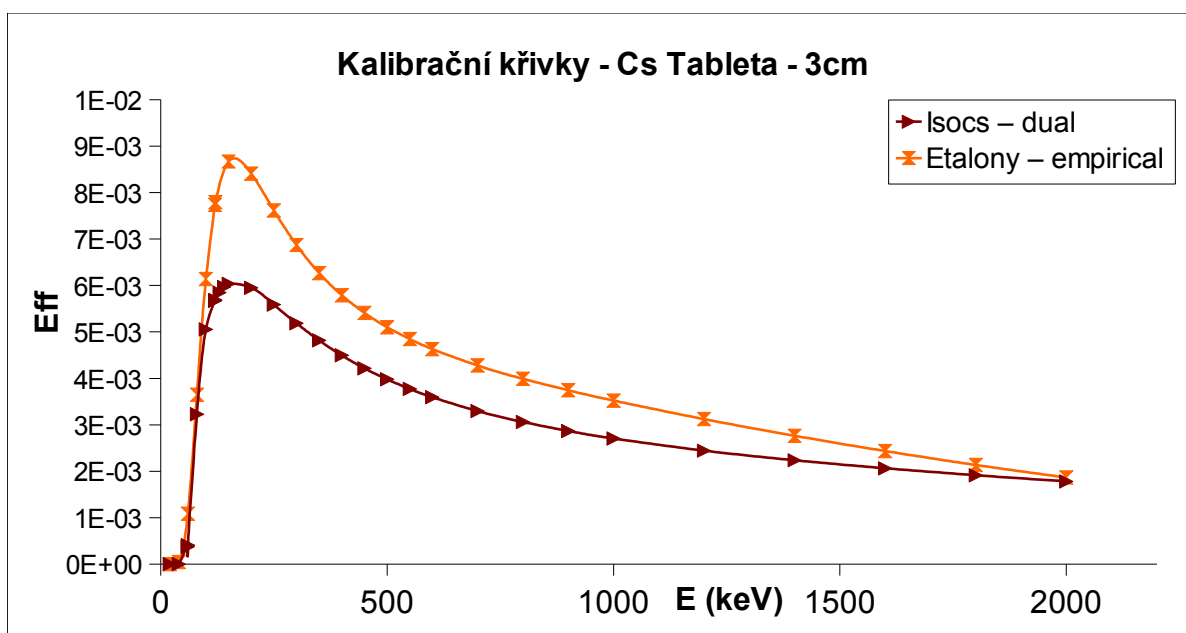
Graf 2: Porovnání kalibračních křivek pro etalony EG3 se štěrbinou kolimátoru 3 cm

Grafy 1 a 2 ukazují poměrně dobrou shodu při kalibraci bez a s korekcí na pravé sumace. Je tedy vliv sumací v těchto geometriích relativně malý, i když není zanedbatelný.

5.2.3. Měření tablety cesia



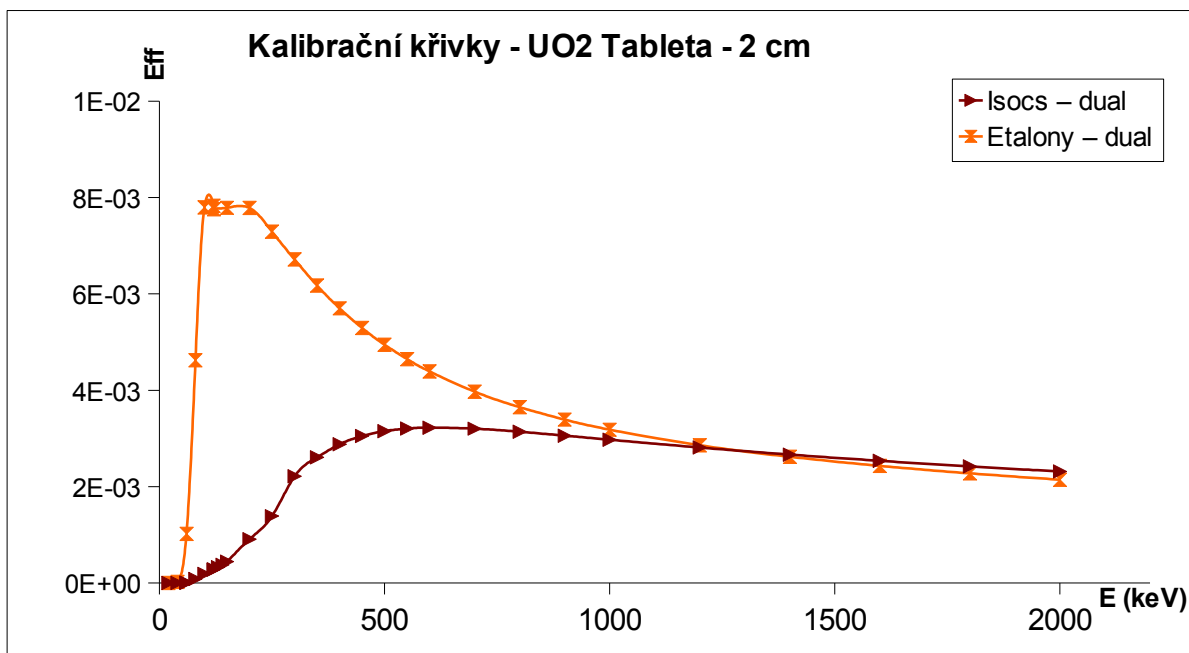
Graf 3: Porovnání kalibračních křivek pro Cs tabletu se štěrbinou kolimátoru 2 cm



Graf 4: Porovnání kalibračních křivek pro Cs tabletu se štěrbinou kolimátoru 3 cm

Jak je na grafech 3 a 4 vidět, rozdíly mezi verzí bez a s korekcí na pravé sumace jsou znatelně větší než pro předchozí případ geometrie EG. Rozdíly jsou největší především pro energie v rozmezí 0 keV až 500 keV a pro vyšší energie se tyto rozdíly stávají menší.

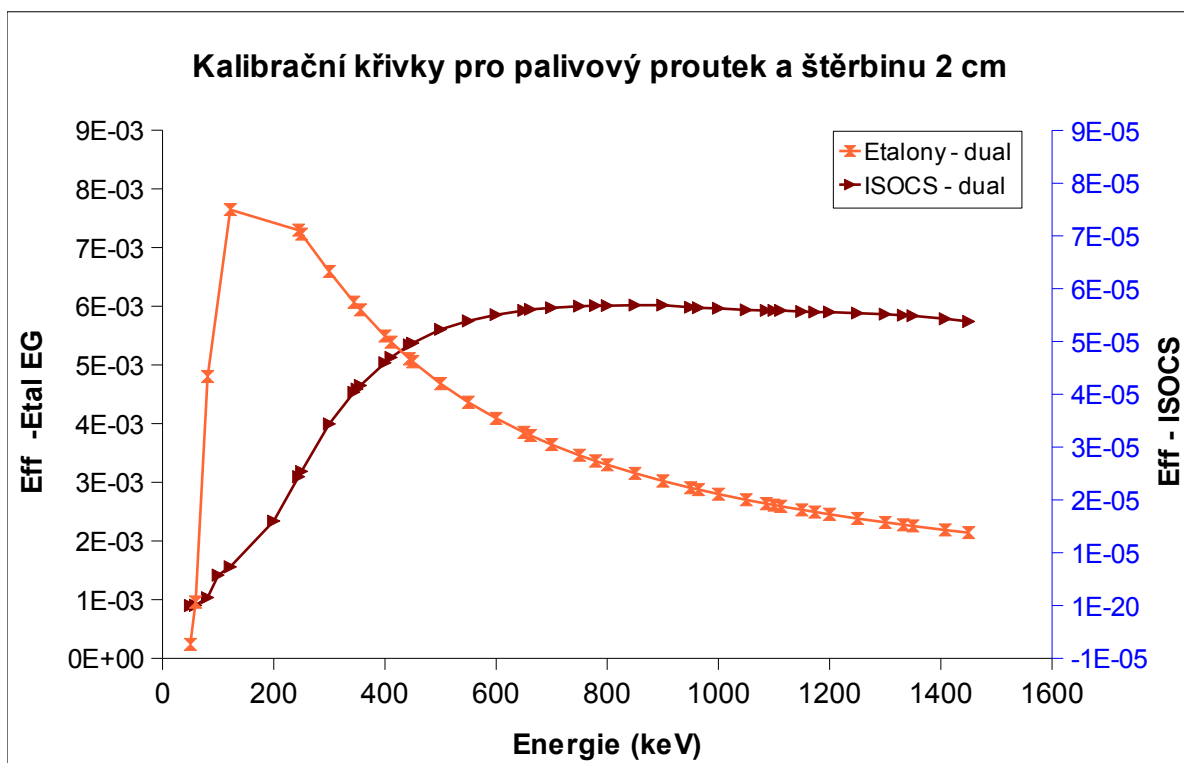
5.2.4. Měření tablety s UO_2



Graf 5: Porovnání kalibračních křivek pro UO_2 tabletu se štěrbinou kolimátoru 2 cm

Jak je z Grafu 5 patrné, největší rozdíly pro model geometrie UO_2 tablety opět nastává při nižších energiích. Např. pro $E = 500$ keV je rozdíl 36,25 %, ale např. pro energii $E = 2000$ keV už jen 7,98 %. Pro vyšší energie si jsou hodnoty účinnosti měření záření gama více podobné.

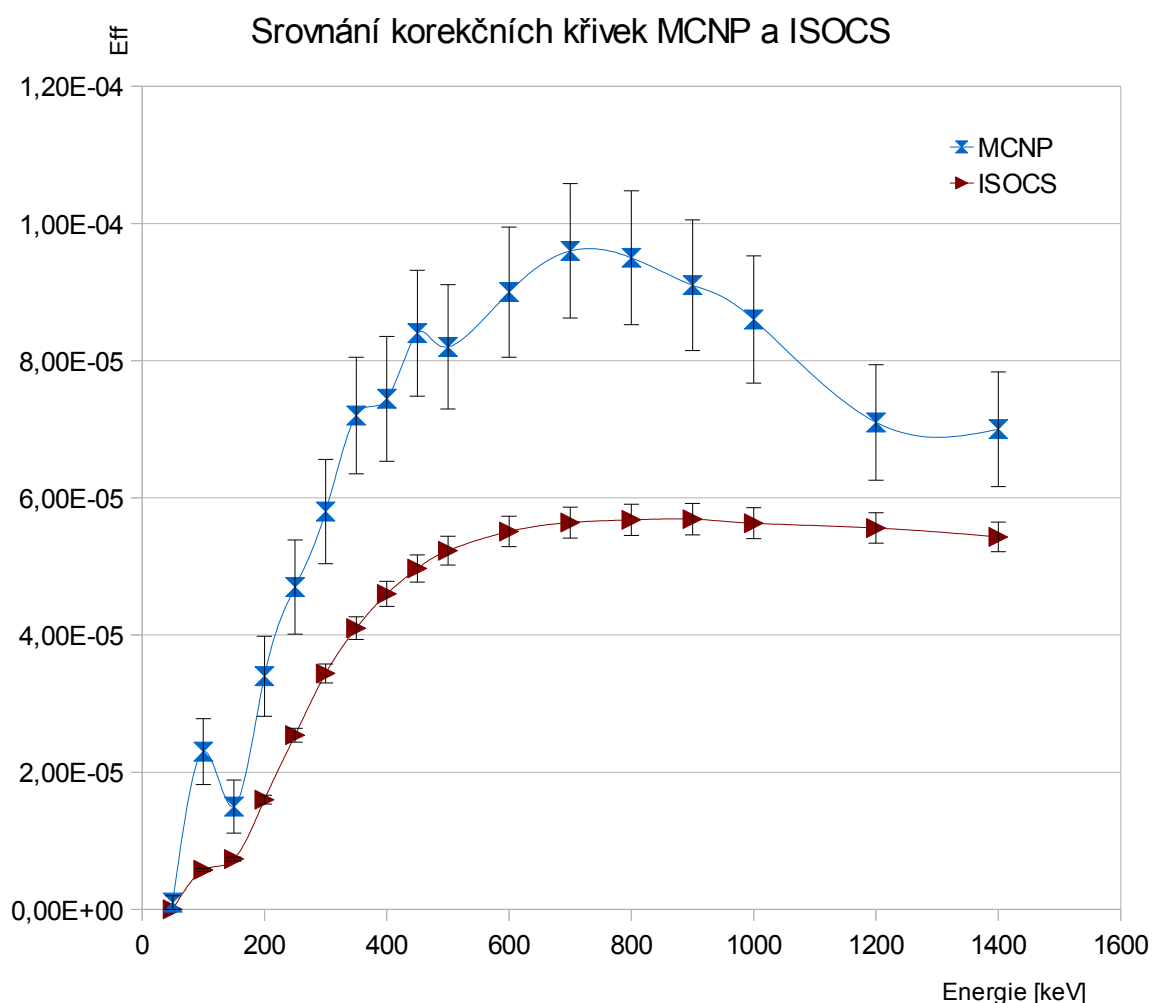
5.2.5. Měření palivového proutku UO_2



Graf 6: Porovnání kalibračních křivek pro palivový proutek se štěrbinou 2 cm

Z grafu 6 vyplývá, že kalibrační křivky se liší nejen tvarem, ale i hodnotami účinností, a to o 2 řády. Efekt pravých sumací se při této testované geometrii uplatňuje nejvíce. Z tohoto faktu vyplývají i velké rozdíly mezi vypočítanými hodnotami aktivit ve změřeném spektru ozářeného palivového proutku.

Kalibrační křivky s korekcí (ISOCS) pro model palivového proutku byly také porovnány s výsledky výpočtu metodou MCNP [21]. Metoda MCNP není zatížena chybou způsobenou pravými sumacemi a výsledné účinnosti pro danou geometrii měření jsou tudíž na tomto efektu nezávislé. Je tudíž výpočet MCNP (pokud databáze geometrie měření, se kterou disponuje, přesně vystihuje realitu) jakýmsi „certifikátem“ pro srovnání s výsledky jiných výpočtů (např. výpočtu metodou ISOCS). Pro níže uvedený výpočet není databáze MCNP zcela přesná, neboť vychází z neúplných údajů výrobce o detektoru. Nicméně lze konstatovat, že databáze je relativně přesná. V grafu 6 je srovnání obou výpočtů kalibračních křivek pro geometrii palivového proutku měřeného na gama-skenovacím zařízení.



Graf 7: Porovnání korekčních křivek vytvořených pomocí MCNP a ISOCS

Z Grafu 7 vytvořeného z dat, které udává tabulka 10 vyplývá, že hodnoty účinností spočtené metodou ISOCS jsou systematicky menší oproti hodnotám MCNP. Zpočátku mají křivky přibližně stejný tvar (přestože „hrbolek“ na křivce pro MCNP není na křivce ISOCS tak patrný), i když jsou rozměrově odlišné. Největší rozdíly jsou u nižších a středních energií (rozdíl 37,33 % pro 700 keV), pro energie vyšší se rozdíly korekcí snižují (23,52 % pro 1400 keV). Na rozdíl od křivky vytvořené pomocí ISOCS, má křivka vypočítaná pomocí MCNP výrazné maximum.

Energie [keV]	MCNP			ISOCS		Odchylka od MCNP [%]
	Korekce	Nejistota	Chyba [%]	Korekce	Nejistota	
50	1,00E-06	1,00E-06	0,0	2,15E-09	8,60E-11	99,79
100	2,30E-05	4,80E-06	20,9	5,76E-06	2,30E-07	74,96
150	1,50E-05	3,87E-06	25,8	7,34E-06	2,94E-07	51,07
200	3,40E-05	5,83E-06	17,2	1,60E-05	6,40E-07	52,94
250	4,70E-05	6,86E-06	14,6	2,54E-05	1,02E-06	45,96
300	5,80E-05	7,62E-06	13,1	3,44E-05	1,37E-06	40,69
350	7,20E-05	8,49E-06	11,8	4,10E-05	1,64E-06	43,06
400	7,44E-05	9,09E-06	12,2	4,60E-05	1,84E-06	38,21
450	8,40E-05	9,16E-06	10,9	4,97E-05	1,99E-06	40,83
500	8,20E-05	9,06E-06	11,0	5,23E-05	2,09E-06	37,74
600	9,00E-05	9,49E-06	10,5	5,51E-05	2,21E-06	32,80
700	9,60E-05	9,80E-06	10,2	5,64E-05	2,26E-06	37,33
800	9,50E-05	9,75E-06	10,3	5,68E-05	2,27E-06	40,83
900	9,10E-05	9,54E-06	10,5	5,69E-05	2,28E-06	40,11
1000	8,60E-05	9,28E-06	10,8	5,63E-05	2,25E-06	38,13
1200	7,10E-05	8,42E-06	11,9	5,56E-05	2,22E-06	35,35
1400	7,00E-05	8,37E-06	12,0	5,43E-05	2,17E-06	23,52

Tabulka 10: Hodnoty pro graf 7 a výpočty odchylek hodnot účinností mezi MCNP a ISOCS pro geometrii palivového proutku

6. Závěr

Byly vytvořeny modely různých geometrií pro měření na gama-skenovacím zařízení LR-0 a vypočteny kalibrační křivky s korekcí na pravé sumace. Používány přitom byly programy fy Canberra pro analýzu spekter zářičů gama.

Výsledky byly testovány pomocí změřených spekter certifikovaných i neznámých zářičů a pomocí výpočtu metodou Monte Carlo (MCNP). Změřená spektra byla vyhodnocena nejen pomocí kalibračních křivek s korekcí (korigované aktivity), ale též pomocí kalibrační křivky bez korekce na pravé sumace (nekorigované aktivity).

Z testování vytvořených modelů pro daný typ detektoru, stínění s kolimátorem a vzdálenost vzorek (zářič) – detektor vyplývají následující závěry:

- Největší rozdíly mezi korigovanou a nekorigovanou účinností detekce jsou u všech typů zářičů pro nízké energie záření gama, se zvětšujícími se hodnotami energie se tento rozdíl zmenšuje.
- Pro geometrii se zářičem typu EG („bodovým“ zdrojem záření) je rozdíl mezi účinností korigovanou a nekorigovanou malý a závisí též na přesnosti měření. Korigované aktivity se liší od certifikovaných hodnot o 3 – 14 %.
- Pro geometrii se zářičem typu césiová tableta („váleček“) je dobrá shoda modelu s certifikátem. Korigované aktivity se liší od certifikovaných v rozmezí 0,6– 3,3 % (nejistota certifikované aktivity je 1,5 %), zatímco nekorigované se liší v rozmezí 18,3-21,5 %.
- Pro geometrii se zářičem typu uranová tableta („váleček“) nebyly k dispozici certifikované hodnoty. Rozdíl korigovaných a nekorigovaných hodnot aktivit radionuklidů, vybraných ve spektru ozářené U-tablety, je ještě větší než v případě měření césiové tablety a činil 33-59%.
- Pro geometrii se zářičem typu palivový proutek z LR-0 jsou rozdíly mezi korigovanými a nekorigovanými hodnotami aktivit radionuklidů, vybranými ve spektru ozářeného proutku, největší a činí jeden až tři řády.
- Model s aproximací železného obalu stínění a model se zanedbáním této vrstvy se nejvíce liší u měření s modelem palivového proutku a nejméně u měření etalonů.
- Rozdíl ve výšce štěrbiny kolimátoru má větší vliv u geometrie s větším modelem radioaktivního zářiče, tedy např. u palivového proutku, na rozdíl od měření, kde

vzorek byl menší nebo stejný jako výška štěrbiny (etalony a tablety).

- Pro geometrii palivového proutku jsou hodnoty korigovaných účinností, ve srovnání s účinnostmi vypočtenými programem MCNPX, systematicky nižší; v rozsahu energií 300-1000 keV se liší cca o 40%, pro energie vyšší než 1000 keV rozdíl klesá a pro energie nižší než 250 keV rozdíl stoupá.

Podrobný rozbor příčin rozdílů v účinnostních kalibracích, naměřených aktivitách a návrh optimalizace stínění není předmětem této práce, ale mohl by být námětem navazující magisterské práce.

Hlavní využitelnost programů *Genie* v praxi spočívá především v možnosti relativně rychle vytvořit kalibraci pro předem charakterizovaný detektor, bez nutnosti využívat drahé etalonové kalibrační zářiče. Toto by bylo především výhodné při použití jednoduššího tvaru stínění, u kterého by se nemusely při modelování provádět žádné aproximace.

7. Seznam literatury

- [1] Centrum výzkumu Řež s. r. o. [Online]. ©2012 [cit. 15.12.2012]. Dostupné z: <http://www.cvrez.cz/web/index.php>
- [2] Centrum výzkumu Řež s. r. o. *LVR-15 detaily a historie* [Online]. ©2012 [cit. 1.2.2012]. Dostupné: <http://www.cvrez.cz/web/lvr-15-detaily-historie#02>
- [3] Centrum výzkumu Řež s. r. o. *Výzkumný reaktor LR-0* [Online]. ©2012 [cit. 1.2.2012]. Dostupné z: <http://www.cvrez.cz/web/vyzkumny-reaktor-lr-0>
- [4] Centrum výzkumu Řež s. r. o. *Detaily a historie LR-0* [Online]. ©2012 [cit. 2012-01-02]. Dostupné z: <http://www.cvrez.cz/web/detaily-historie-lr-0>
- [5] Centrum výzkumu Řež s. r. o. *Experimentální záření* [Online]. ©2012 [cit. 1.2.2012]. Dostupné z: <http://www.cvrez.cz/web/experimentalni-smycky>
- [6] Radiobiologie. 1.5.2. *Veličiny charakterizující pole záření*. [Online]. [cit. 14.2.2012]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/15/152.html>
- [7] RNDr. Vojtěch Ullmann. *Detekce a aplikace ionizujícího záření*. [Online]. ©2012 [cit. 15.12.2012] Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm>
- [8] M. Švadlenková, L. Heraltová: *Analýza propustnosti Pb stínění HPGe detektoru pro skenování gama palivových proutků – I. Experiment*. Zpráva ÚJV 13048 R, 2008.
- [9] V. Juříček: *Modernizace systému řízení a sběru dat pro axiální gama scanner*. Zpráva ÚJV 1303 AT, 2004.
- [10] RNDr. Vojtěch Ullmann. *Jaderná a radiační fyzika. 1.2. Radioaktivita* [Online]. ©2012 [cit. 15.12.2012] Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika2.htm>
- [11] J. Jandl, I. Petr: *Ionizující záření v životním prostředí*. SNTL Praha 1988
- [12] RNDr. Vojtěch Ullmann. *Jaderná a radiační fyzika. 1.6 Ionizující záření*. [Online]. ©2012 [cit. 15.12.2012]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika6.htm>
- [13] J. Šeda a kol.: *Dozimetrie ionizujícího záření*. SNTL/ALFA Praha 1983
- [14] RNDr. Vojtěch Ullmann. *Detekce a aplikace ionizujícího záření. 2.5 Polovodičové detektory*. [Online]. ©2012 [cit. 15.12.2012] Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm#5>
- [15] M. Ohera: *Úvod do polovodičové gamaspektrometrie*. Envi Brno, 2000.
- [16] Canberra Industries, [Online] [cit. 10.3.2012] <http://www.canberra.com>.
- [17] Canberra Industries, Inc. : *Geometry Composer User's Manual*. 2009
- [18] L. Heraltová, M. Švadlenková: *Analýza propustnosti Pb stínění HPGe detektoru pro skenování gama palivových proutků – II. Výpočty*. Zpráva ÚJV 13048 R, 2008.

- [19] Český Metrologický Institut. *Etalony typu EG*. [online] ©2012 [cit. 07.12.2011]
Dostupné z: <http://www.cmi.cz/index.php?lang=1&wdc=214>
- [20] H. Cember, *Introduction to health physics, Second edition*, 3. vydání, Northwestern University, Pergamon press, 1983, ISBN 0-08-030936-4
- [21] M. Košťál. *Ústní zdělení*. Centrum Výzkumu Řež s. r. o. 17.4.2012

8. Přílohy

8.1. Přílohy teoretické části

Nádoba reaktoru LR-0

Výška: 3,5 m

Průměr: 6,5 m

Provozní podmínky

Max. výkon 1 kW

Po 1 hodinu max 5 kW

Max. termální tok $10^{13} \text{ nm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Tlak atmosférický

Teplota pokojová až do 70°C
nebo po zahřátí

Palivo

Zkrácené palivové kazety typ

VVER-1000 a VVER-440

Palivové články v kazetě:

Aktivní délka 1,25 m

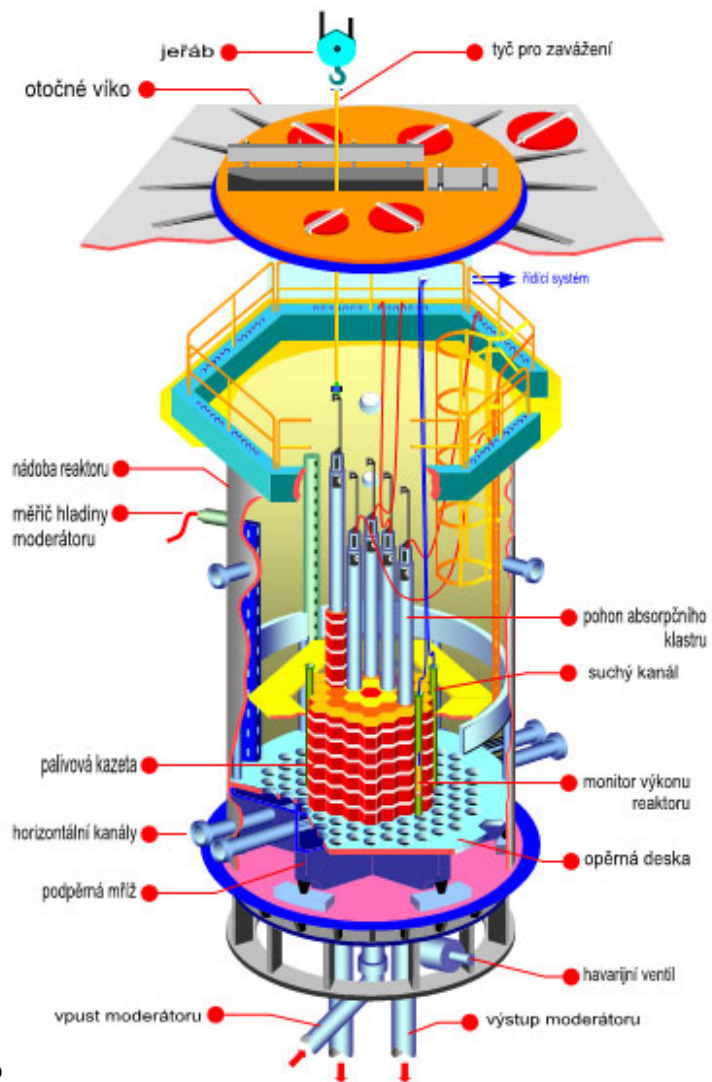
Průměr 9,15 mm

Tloušťka 0,72 mm

Materiál ZrNb

Palivové tablety UO_2

Obohacení 1,6 – 4,4 %



Obr. P1.1: Schéma a parametry reaktoru LR-0 [3]

Řízení výkonu

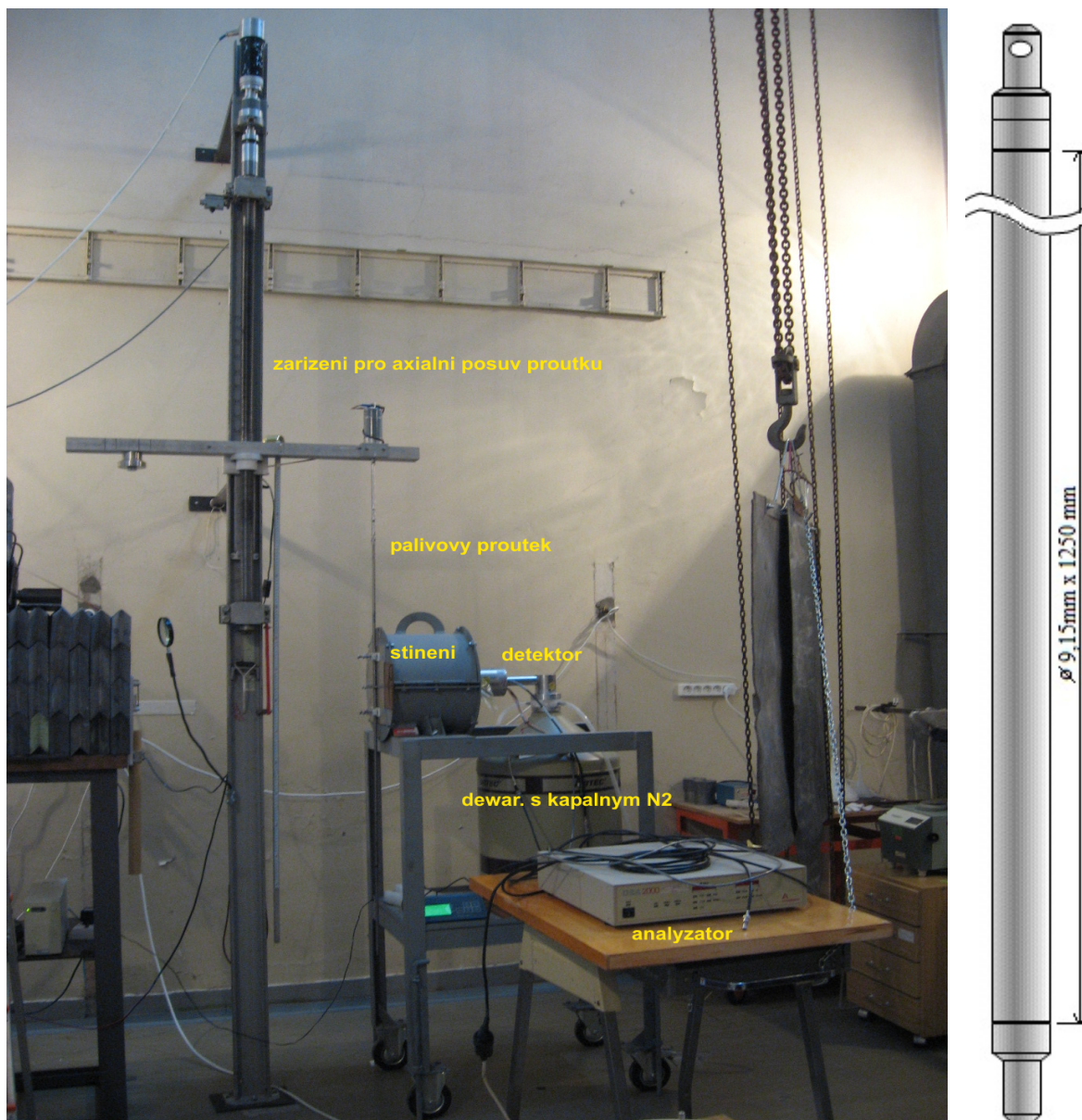
Moderátorem H_3BO_3

Konc. H_3BO_3 0 – 12 g/kg

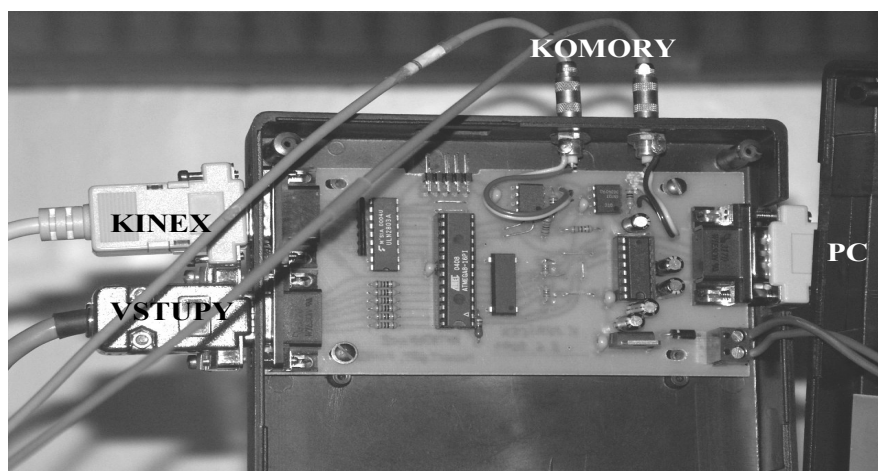
Absorpční klastr tableta B_4C

Stínění

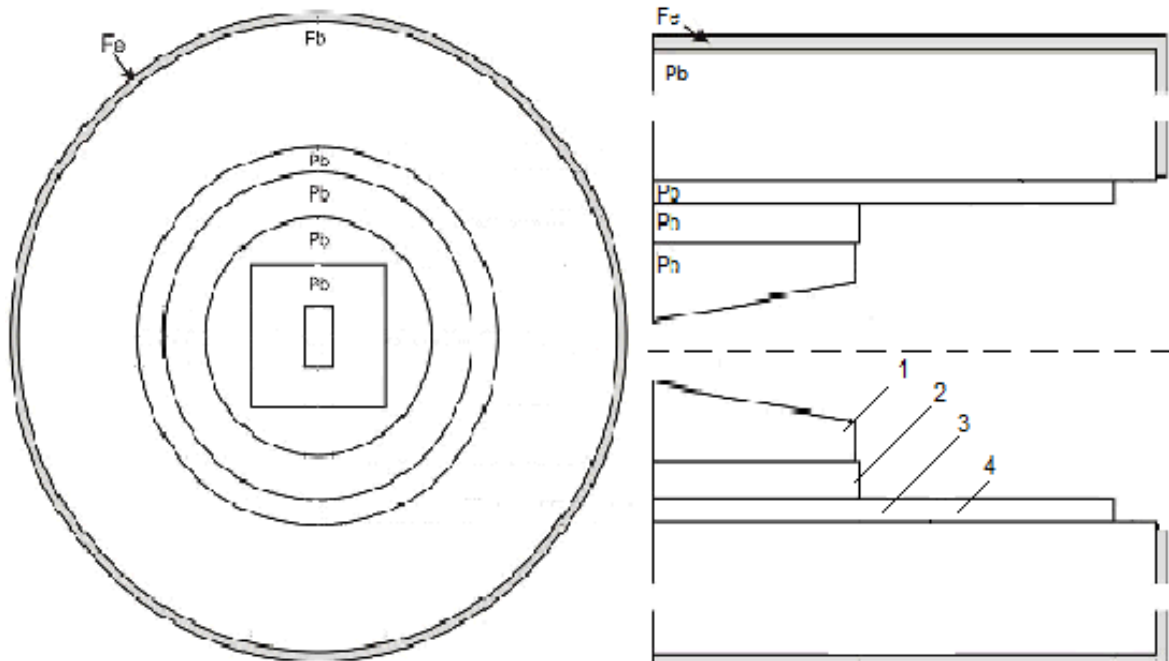
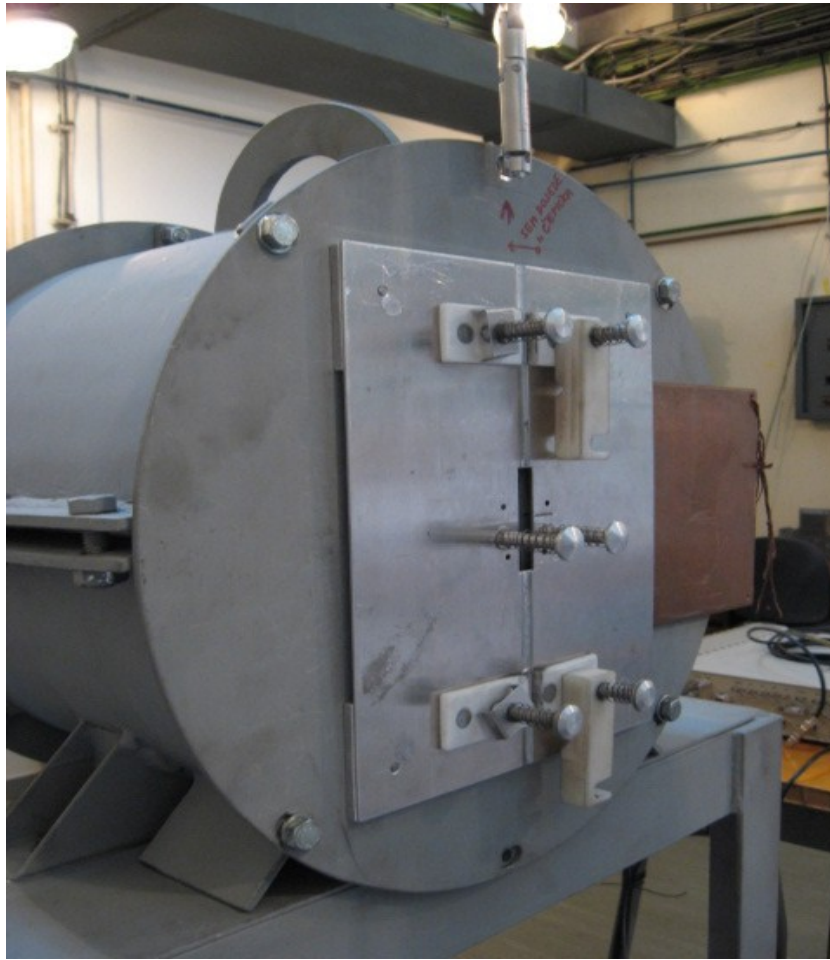
Betonový bunkr, kadmiový plech, pojízdné plošiny, vrata.



Obr. P1.2: Celkový pohled na zařízení pro gama-skenování palivových proutků a náčrsek palivového proutku [8]



Obr. P1.3: Krabice s řídicí deskou a připojenými kabely [9]



Obr. P1.4: Foto a náčrt stínění detektoru. [8]

8.1.1. HPGe Coaxial Detector – model number GEM70-PLUS

Průměr krystalu = 74,6 mm

Délka krystalu = 87,9 mm

Maximální napětí = + 3500 V při
připojení krystalu na chlazení

Rozlišení FWHM při 1,33MeV pro
 ^{60}Co = 2,0 keV

Poměr pík-Compton ^{60}Co =75:1

Relativní efektivnost při 1,33MeV
 ^{60}Co = 70%

Tvar píku (FWTM/FWHM) ^{60}Co = 2

Rozlišení (FWHM) při 122 keV pro
 ^{60}Co = 1,00 keV



Obr. P1.5: Detektor ORTEC [8]

A – Délka držícího víčka (Mount cup, length)

B – Mezera mezi krystalem a vnějším víčkem
(End cap to crystal gap)

E – Základna držícího víčka (Mount cup base)

D – Okénko vnějšního víčka (End cap window)

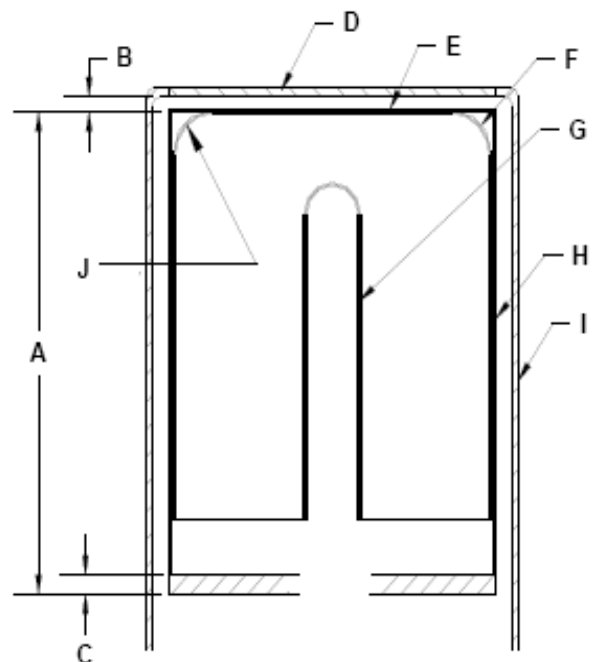
E – Izolátor / stínění (Insulator / shield)

F – Vnější kontaktní vrstva (Outside contact
layer)

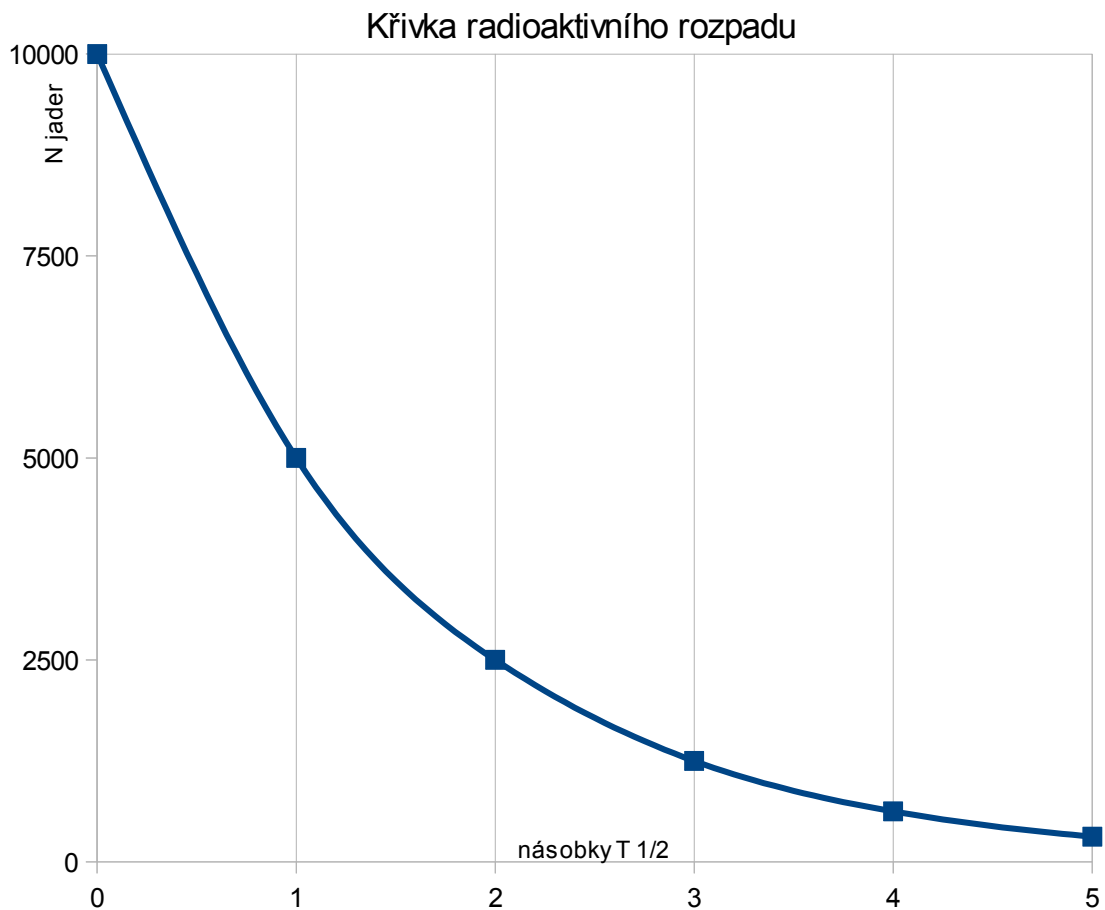
G – Kontaktní vrstva uvnitř díry (Hole contact
layer)

H – Stěna držícího víčka (Mount cup wall)

I – Stěna vnějšního víčka (End cap wall)



Obr. P1.6: Řez detektorem s krystalem
germánie



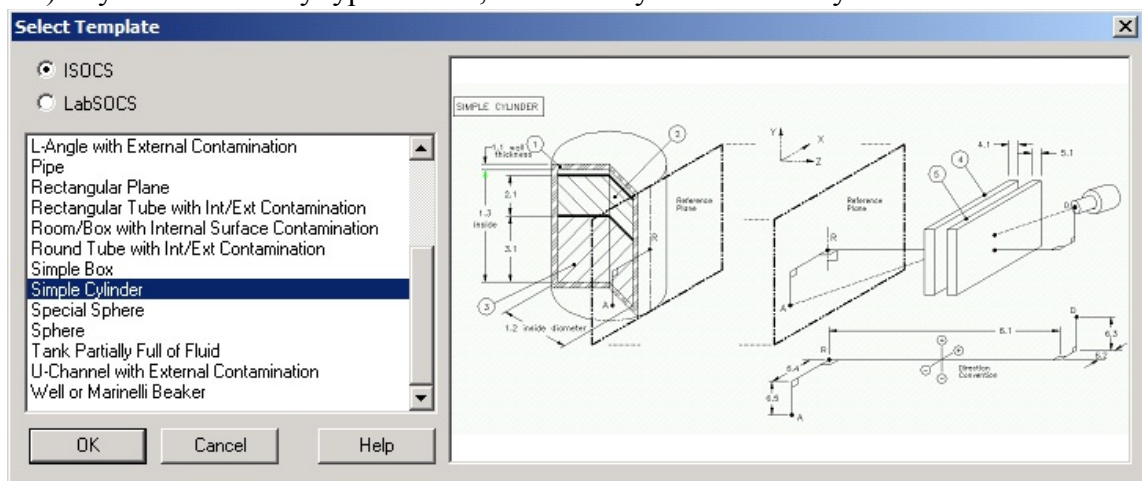
Obr. P1.7: Graf zobrazující počet zůstávajících jader v závislosti na čase

8.2. Přílohy k praktické části

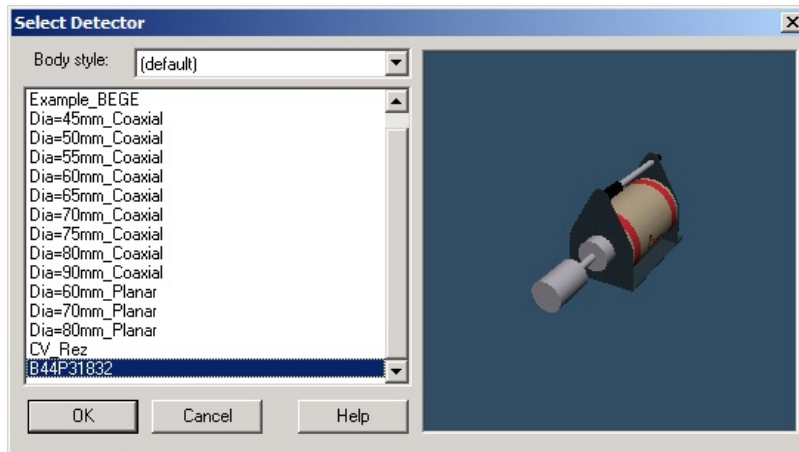
8.2.1. Obecný postup vytváření nové geometrie v Geometry Composer pro účinnostní kalibraci v programu ISOCS.

1) *Detektor vzorek:*

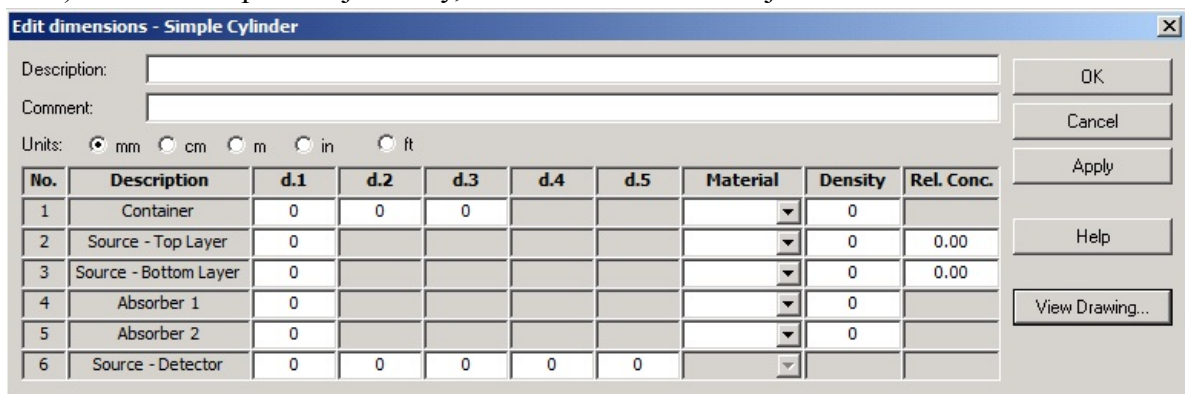
- 1) Založíme nový soubor **File** → **New**, nebo odpovídající ikonou **New**
- 2) Vybereme šablony typu ISOCS, a z menu vybereme vhodný tvar vzorku



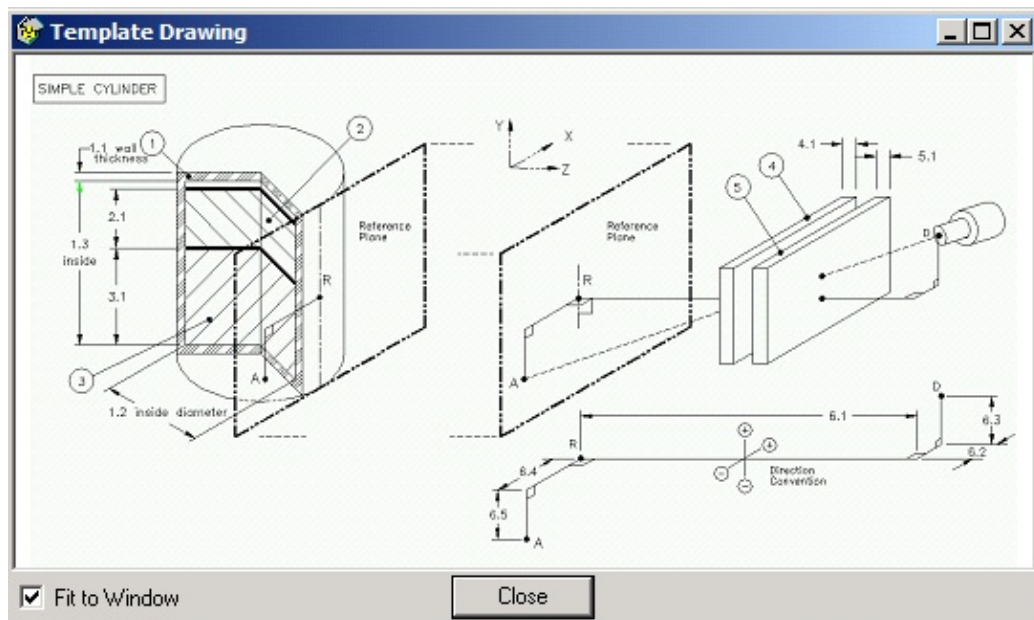
- 3) Vybereme použitý detektor



- 4) Vyplníme Popis (description) a Komentář (Comment), ne víc 16ti znaků
- 5) Zvolíme si použité jednotky, desetinná místa se určují tečkou.



- 6) Zobrazení nákresu (View Drawing) pomůže lepší orientaci v kótách



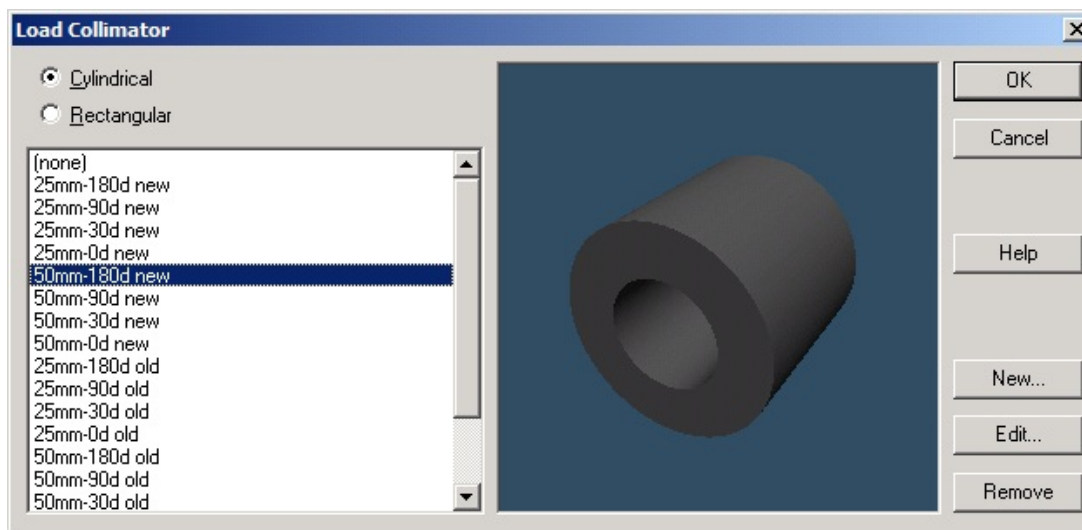
- 7) Vyplníme příslušné rozměry a hodnoty a doplníme používaný materiál (není-li v seznamu, vytvoříme jej volbou New – viz sekce III)
- 8) Jako položky Absorber 1 a 2 můžeme doplnit absorbátory o čtvercovém průřezu s různou tloušťkou.

9) Pomocí menu **Edit** můžeme pomocí volby **Dimensions** později upravit rozměry vzorku. **Select Detector** můžeme vybrat jiný detektor.

10) Pomocí **Save** se geometrie uloží jako .geo a .gis do stejného místa

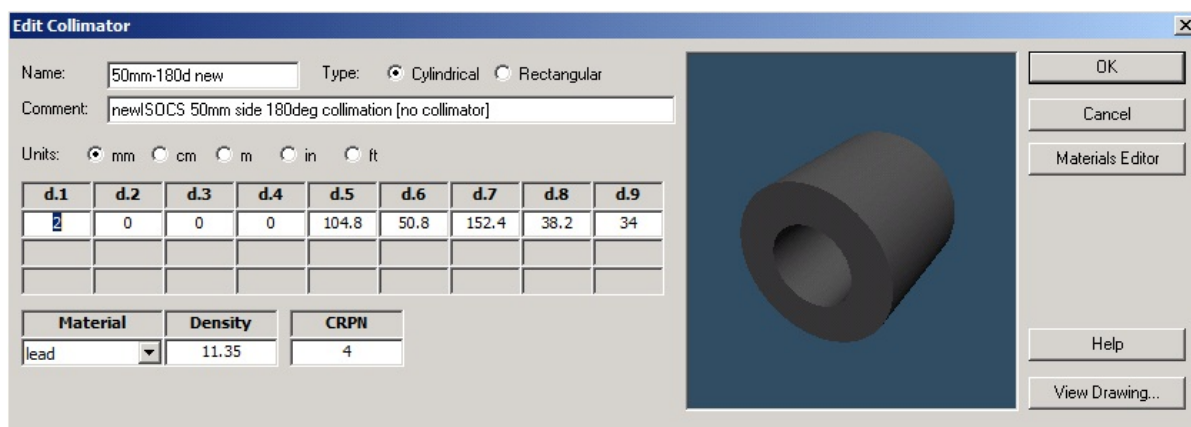
II) Stínění s kolimátorem (není-li přítomné, pokračujeme sekci IV)

1) Vybereme **Edit** → **Collimator** pro přidání stínění s kolimátorem (dále jen kolimátor)

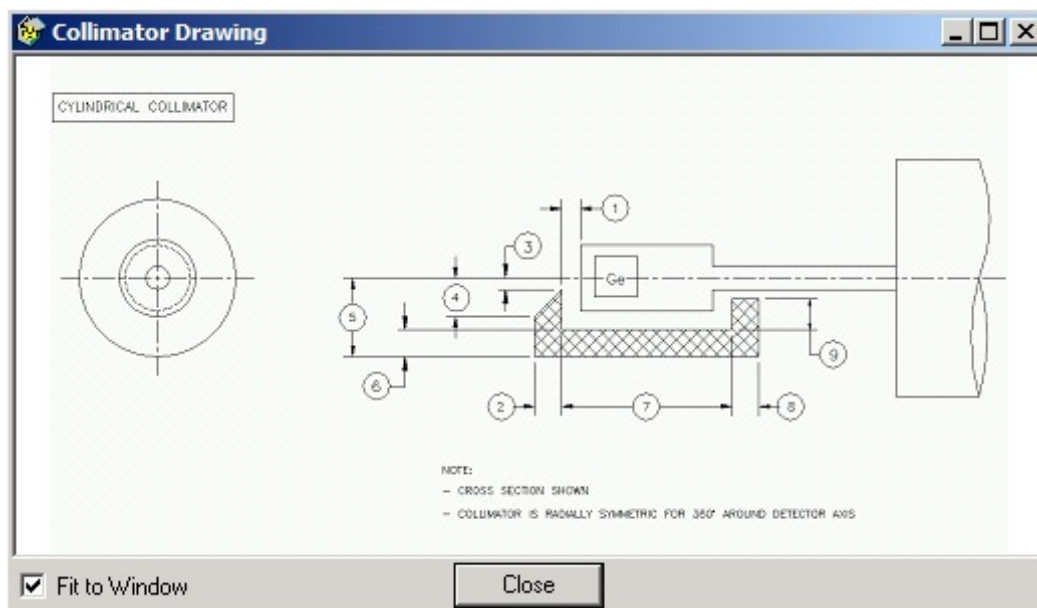


2) Vybereme základní tvar (válcový-Cylindrical nebo kvádrový-Rectangular) a dále pro zvolený tvar vybereme z nabídky programu vhodný typ kolimátoru. Pomocí volby **Edit** můžeme upravit vybraný typ, nebo pomocí volby New vytvoříme svůj vlastní kolimátor, který se po uložení automaticky přidá do seznamu kolimátorů daného základního tvaru.

3) Při vytváření nového vybereme tvar a vyplníme jméno (Name) a komentář (Comment)



4) Zvolíme jednotky a vyplníme rozměry a materiál s pomocí zobrazení (View Drawing)

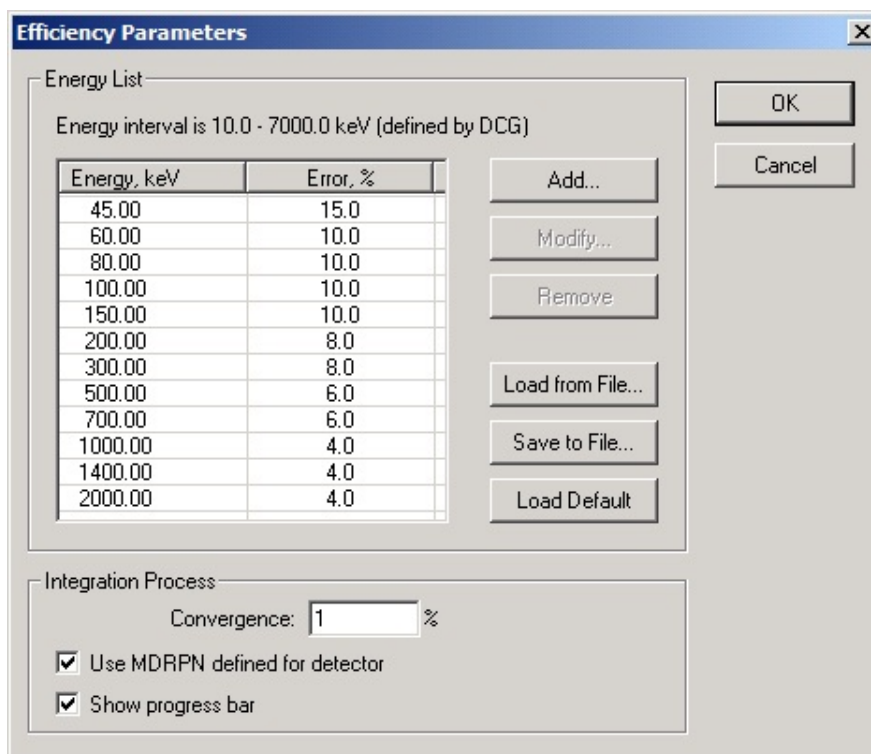


5) Pomocí **Save** se geometrie uloží jako .geo a .gis do stejného místa

III) *Podvodní opláštění (není-li přítomné, pokračujeme sekci IV)*

1) Pomocí volby Edit → Housing můžeme do geometrie zahrnout podvodní opláštění, při jehož tvorbě se postupuje stejně jako v ostatních případech

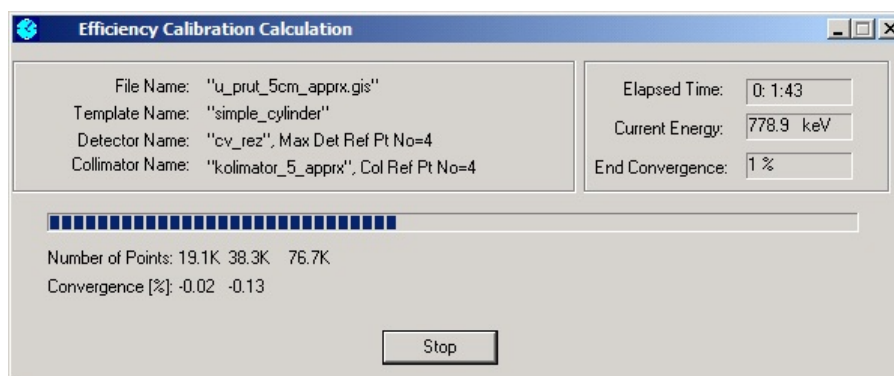
IV) *Data korekční křivky – Energy list*



1) Seznam energií a přípustných chyb pro které se mají data korekční křivky vypočítat se může upravit pomocí volby **Edit** → **Efficiency curve** → **Parameters**, nebo příslušné ikony

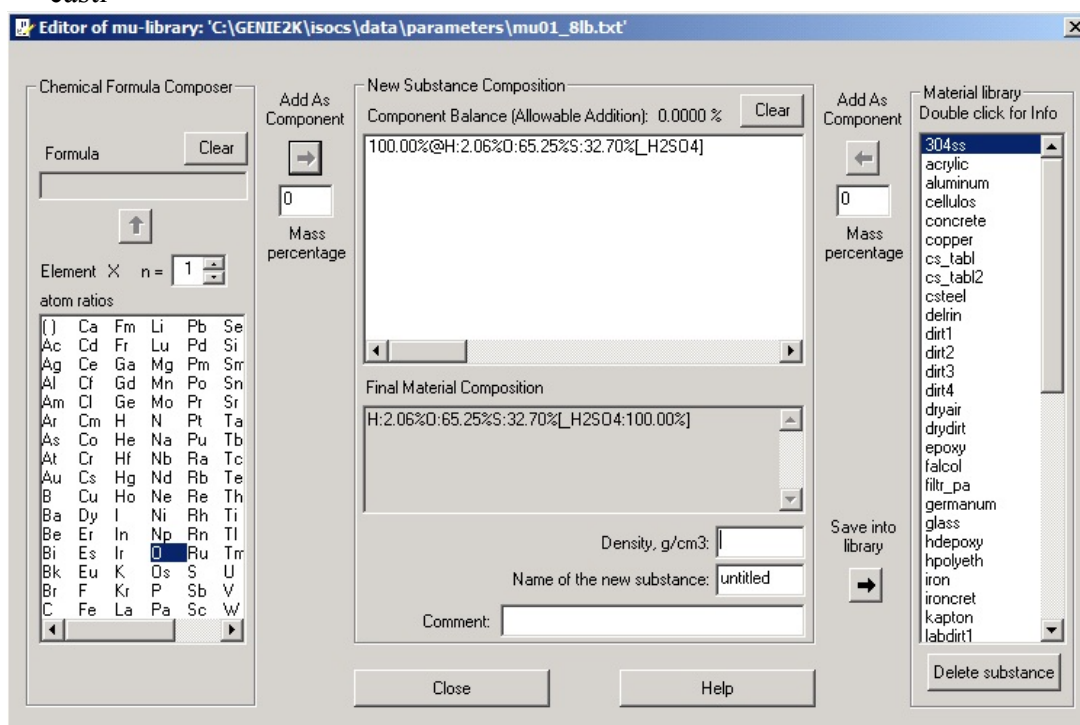
2) Volbou **Edit** → **Efficiency curve** → **Generate data points...** vytvoříme soubor s

příponou .ecc obsahující data k korekční účinnostní křivce uložený do adresáře se soubory geometrie .geo a .gis



Pozn. - Materiál

- 1) Vybereme **Edit** → **Material library**
- 2) V levé části vyberat postupně prvky tak jak se v materiálu nacházejí, například pro H_2SO_4 vyberat H a za n = dáme 2. Mažeme tl. **Clear**.
- 3) Stisknout šipku nahoru a vybrat další prvek, například S a za n= dáme 1, šipkou nahoru přidáme již k napsanému vodíku.
- 4) Další by v tomto případě následovalo O s n = 4.
- 5) Šipkou nahoru přidáme. Vlevo od chemické formule zvolit kolik % z výsledného materiálu tvoří tato látka a šipkou → přidat do seznamu konečné směsi v centrální části



- 6) Nastavíme jméno, komentář a hustotu.
- 7) Šipkou → přidáme do konečného seznamu materiálů.

8.2.2. Postup tvorby konkrétního modelu geometrie pro gama-skenování UO₂ tablety v palivovém proutku v *Geometry Composer* :

- 1) **File** → **New** → Select template (ISOCS) = Simple Cylinder
- 2) Select Detector = B44P31832
- 3) Description = 20120314 CVRez 2 cm
- 4) Comment = approx_2cm_0abs
- 5) Units = mm

6)

No.	Description	d.1	d.2	d.3	d.4	d.5	Material	Density	Rel. Conc.
1	Container	0,9	7,53	20			proutek	6,44	
2	Source – Top layer	0					none	0	0
3	Source – Bottom layer	20					uo2	10,95	1
4	Absorber 1	0					none	0	
5	Absorber 2	0					none	0	
6	Source – Detector	112,78	0	0	0	0			

A) Material původně New... → materiálová knihovna

B) U n=1 O n=2 Mass percentage = 100

C) Density = 10,95 Name = uo2 Comment=Oxid_uranicity

D) Zr n=1 Mass percentage = 98,97%

E) Nb n=1 Mass percentage = 1%

F) Hf n=1 Mass percentage = 0,03%

G) Density = 6,44 Name = proutek

Comment=palivovy_proutek

8) **Edit** → **Collimator** → **Rectangular** → **New**

9) Name = Kolimator Comment = Aprox_stineni

Type = Rectangular Units = mm

10)

d.1	d.2	d.3	d.4	d.5	d.6	d.7
0	101,5	24	5,104	178,7	122,7	0

d.8	d.9	d.10	d.11	d.12	d.13	d.14
		24	10,0365	178,7	122,7	0

Material
lead

Density
11,35

CRPN
4

11) **Edit** → **Efficiency Curve** → **Generate data points...**

8.2.3. Výpočty pro nahrazení kruhového průřezu průřezem čtvercovým

Z důvodů nedostačujících modelů se přistoupilo k nahrazení kruhového průřezu stínění stíněním s opsaným čtvercovým průřezem. Tím zůstane zachována tloušťka stínění v kolmém směru. Problém pak může nastat při záření ne svisle k ose stínění, ale šikmém. Takové záření by při původním modelu mohlo stínění úplně minout, avšak při stínění s čtvercovým průřezem se takto jdoucí záření může pomocí comptonovského efektu odrazit směrem k detektoru a projít stíněním. Zářič je umístěn směrem od čela detektoru ve vzdálenosti 11,23 cm. Tloušťka kterou by muselo záření projít, pokud by šlo přímo kolmo skrz olověné stínění je 5,07 cm. Nejkratší možná cesta záření stíněním je šikmo do „rohu průřezu“ a odtud do detektoru. Tuto cestu ve zvoleném hranatém modelu lze vypočítat jako tělesovou úhlopříčku kváдру, jehož jedna hrana je 5,62 cm. Polovinu původní vzdálenosti by částice procházely vzduchem a zbylou dráhu materiálem stínění. Zbývající dvě hrany měří 5,07 cm. Pro dráhu záření lze proto využít následující vztah:

$$u = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \quad (\text{P2.1})$$

V tomto případě se tedy dráha kterou by muselo záření urazit rovná:

$$u = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2} = \sqrt{5,62^2 + 5,07^2 + 5,07^2} = 9,1 \text{ cm} \quad (\text{P2.2})$$

Pokud se ovšem aplikuje comptonův jev, pro změnu směru letu částic radioaktivního záření, potom tyto částice mají menší energii a to podle vztahu:

$$E_{\gamma'} = E_{\gamma} \div \left[1 + \left(\frac{E_{\gamma}}{m_{oe} c^2} \cdot (1 - \cos \vartheta) \right) \right] \quad (\text{P2.3})$$

Podle tohoto vztahu následně vychází následující údaje pro $E_{\gamma'}$ (E_{γ} , δ):

$E_{\gamma'} (0,5 \text{ MeV}, 45^\circ) = 0,39 \text{ MeV}$	$E_{\gamma'} (0,5 \text{ MeV}, 90^\circ) = 0,25 \text{ MeV}$
$E_{\gamma'} (0,8 \text{ MeV}, 45^\circ) = 0,55 \text{ MeV}$	$E_{\gamma'} (0,8 \text{ MeV}, 90^\circ) = 0,31 \text{ MeV}$
$E_{\gamma'} (1,0 \text{ MeV}, 45^\circ) = 0,64 \text{ MeV}$	$E_{\gamma'} (1,0 \text{ MeV}, 90^\circ) = 0,34 \text{ MeV}$
$E_{\gamma'} (1,5 \text{ MeV}, 45^\circ) = 0,81 \text{ MeV}$	$E_{\gamma'} (1,5 \text{ MeV}, 90^\circ) = 0,38 \text{ MeV}$
$E_{\gamma'} (2,0 \text{ MeV}, 45^\circ) = 0,93 \text{ MeV}$	$E_{\gamma'} (2,0 \text{ MeV}, 90^\circ) = 0,41 \text{ MeV}$

Údaje pro úhel 45° jsou více méně orientační, neboť aby částice radioaktivního záření změnila comptonovským efektem směr k detektoru (a to nejkratší cestou), bude původní a nová trasa svírat úhel 90° . Částice radioaktivního záření s touto novou energií budou procházet skrz materiál o tloušťce 9,1 cm. Zde platí vztah pro úzce kolimovaný svazek záření:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot d} \quad (\text{P2.4})$$

Při jeho aplikaci lze za pomoci dosazení $I_0 = 100$ spočítat, kolik procent svazku I o určité energii projde daným materiálem s koef. součinitele lineárního zeslabení μ , viz. Tabulka 11,

o definované tloušťce d . Podle tohoto vztahu můžeme spočítat kolik procent z původního svazku by prošlo pro energii 0,5 MeV (z původní energie 2 MeV snížené po rozptylu):

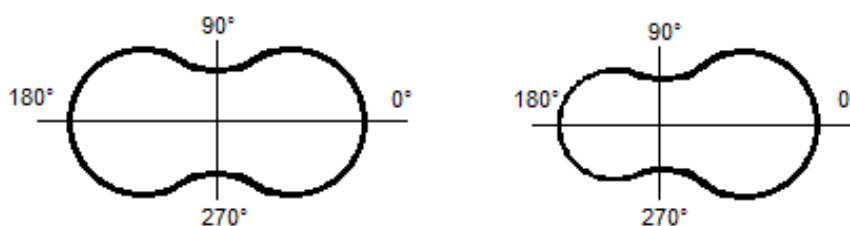
$$I = 100 * e^{-1,64 \cdot 9,1} = 33 \cdot 10^{-6}$$

Z tohoto výpočtu je vidět, že tak velkým množstvím olova neprojde takřka žádné záření o energii 0,5 MeV, které bylo původně zářením s energií víc než 2 MeV.

Je ovšem možné uvažovat, že by díky Comptonovskému efektu změnilo směr záření o vyšší energii, jehož nová energie by pak byla dostatečná k tomu, aby prošla vrstvou stínění. V tomto případě ale přichází v úvahu zákony o zachování hybnosti, kdy foton o vysoké energii má také vysokou hybnost a tudíž se jeho dráha pohybu změní obtížněji. Naopak fotony s nižší energií, které mají větší pravděpodobnost odchýlení o větší úhel mají poté příliš nízkou energii na to, aby prošly stíněním. Na obrázku Obr. P2.1 jsou vyobrazeny diagramy znázorňující pravděpodobnost odrazu fotonu do různých směrů v závislosti na jejich nové energii. Obrázek vlevo je pro fotony s nižší počáteční energií a obrázek vpravo je pro fotony s vyšší počáteční energií. Fotony s vyšší energií mají tendenci zachovávat přibližně stejný směr. Pokud tedy budeme uvažovat o záření s vysokou energií s upraveným modelem stínění, má toto záření menší pravděpodobnost odražení se směrem k detektoru.

Tabulka 11: Lineární koeficient součinitele zeslabení μ [cm^{-1}] pro různé materiály a energie fotonů záření gama [20]

		Energie fotonu					
Materiál	Hustota	0,1 MeV	0,15 MeV	0,2 MeV	0,3 MeV	0,5 MeV	0,8 MeV
	g/cm^3	μ [cm^{-1}]					
C	2,25	0,335	0,301	0,274	0,238	0,196	0,159
Al	2,7	0,435	0,362	0,324	0,278	0,227	0,185
Fe	7,9	2,72	1	1,09	0,838	0,655	0,525
Cu	8,9	3,8	1,83	1,309	0,96	0,73	0,581
Pb	11,3	59,7	20,8	10,15	4,02	1,64	0,945
Materiál	Hustota	1 MeV	1,5 MeV	2 MeV	3 MeV	5 MeV	8 MeV
	g/cm^3	μ [cm^{-1}]					
C	2,25	0,143	0,117	0,1	0,08	0,061	0,048
Al	2,7	0,166	0,135	0,117	0,096	0,076	0,065
Fe	7,9	0,47	0,383	0,335	0,285	0,247	0,233
Cu	8,9	0,52	0,424	0,372	0,318	0,281	0,27
Pb	11,3	0,771	0,579	0,516	0,476	0,482	0,518



Obr. P2.1: Fázový diagram úhlového rozložení rozptýlených fotonů

8.2.4. Výpočty pro nahrazení vrstvy železa vrstvou olova po obvodu

Tabulka 12: Koeficienty součinitele lineárního zeslabení pro vybrané materiály

[cm ⁻¹]	g/cm ³	0,1 MeV	0,15 MeV	0,2 MeV	0,3 MeV	0,5 MeV	0,8 MeV
Fe	7,9	2,72	1	1,09	0,838	0,655	0,525
Pb	11,3	59,7	20,8	10,15	4,02	1,64	0,945

[cm ⁻¹]	g/cm ³	1 MeV	1,5 MeV	2 MeV	3 MeV	5 MeV	8 MeV
Fe	7,9	0,47	0,383	0,335	0,285	0,247	0,233
Pb	11,3	0,771	0,579	0,516	0,476	0,482	0,518

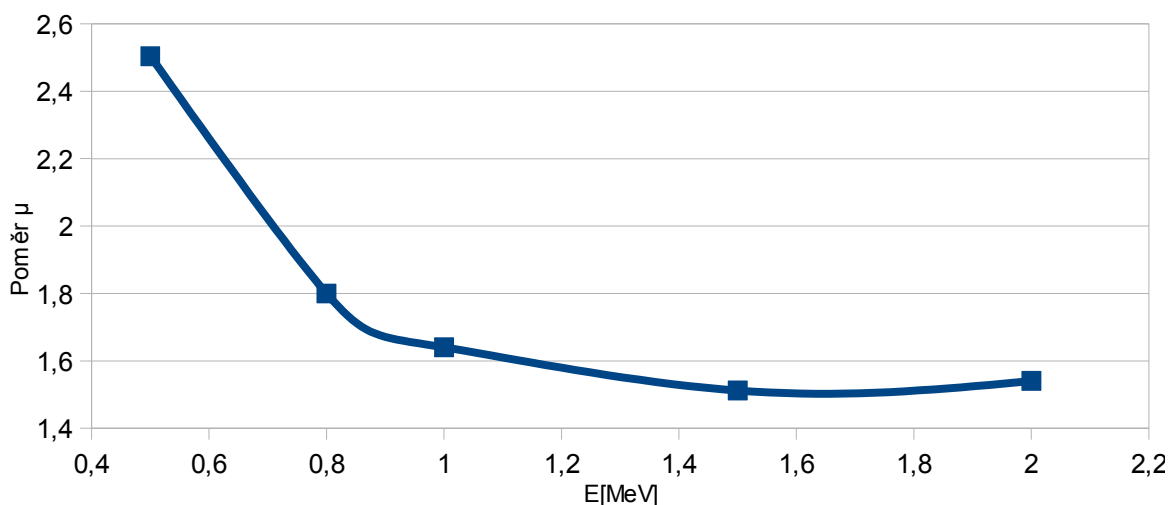
Základem úvah opět vztah pro úzce kolimovaný svazek (P4). Úkolem bylo určit, kolik cm olova (Pb) by muselo nahradit 0,3cm železa (Fe), aby byly vyrovnány jejich rozdílné pohltivosti záření. Toho se dosáhne porovnáním lineárních koeficientů zeslabení μ pro železo a olovo, viz. Tabulka 12. Pro energie, které jsou více významné viz Tabulka 13.

Tabulka 13: Tabulky pro porovnání koeficientu lineárního zeslabení vybraných energií a materiálů a jejich poměru

	μ [cm ⁻¹]	E [MeV]
Fe	0,655	0,5
Pb	1,640	
Fe	0,525	0,8
Pb	0,945	
Fe	0,470	1
Pb	0,771	
Fe	0,383	1,5
Pb	0,579	
Fe	0,335	2
Pb	0,516	

E [MeV]	poměr μ
0,50	2,50
0,80	1,80
1,00	1,64
1,50	1,51
2,00	1,54

průměrně 1,80



Graf 8: Graf postupné změny poměru lineárního koeficientu zeslabení μ

Jak je z vypočtených hodnot vidět a znázorněno grafem (viz Graf 8), poměr koeficientu lineárního zeslabení neklesá lineárně se vzrůstající energií, ale přibližně exponenciálně, z tohoto důvodu nelze použít čistý průměr, který činí 1,80. Podle grafu však pro větší rozsah energií platí poměr nižší než 1,80 a je mu tedy přiložena větší váha.

Na základě výsledku se přistoupilo na poměr, že vrstvu železa nahradí přibližně 1,75x tenčí vrstva olova. Toto bylo ověřeno pomocí výpočtů pro železo o tloušťce 0,3 cm a olovo 0,17 cm ($0,3 : 1,75 = 0,17$). Výpočty byly provedeny pro energie od 0,5 MeV do 2 MeV, neboť právě tyto energie byly v provedených spektrometrických měření nejpodstatnější.

Železo

E = 0,5MeV	E = 0,8MeV	E = 1,0MeV	E = 1,5MeV	E = 2,0MeV
d = 0,3cm	d = 0,3cm	d = 0,3cm	d = 0,3cm	d = 0,3cm
$\mu = 0,655 \text{ cm}^{-1}$	$\mu = 0,525 \text{ cm}^{-1}$	$\mu = 0,470 \text{ cm}^{-1}$	$\mu = 0,383 \text{ cm}^{-1}$	$\mu = 0,335 \text{ cm}^{-1}$
I ₀ = 100%	I ₀ = 100%	I ₀ = 100%	I ₀ = 100%	I ₀ = 100%
$I = I_0 * e^{-\mu d}$	$I = I_0 * e^{-\mu d}$	$I = I_0 * e^{-\mu d}$	$I = I_0 * e^{-\mu d}$	$I = I_0 * e^{-\mu d}$
$I = 100 * e^{-0,655 * 0,3}$	$I = 100 * e^{-0,525 * 0,3}$	$I = 100 * e^{-0,470 * 0,3}$	$I = 100 * e^{-0,383 * 0,3}$	$I = 100 * e^{-0,335 * 0,3}$
I = 82,16%	I = 85,43%	I = 86,85%	I = 89,15%	I = 90,44%

Následně byly spočítány stejné údaje pro 0,17 cm silnou vrstvu olova (Pb) pro mohli porovnání propustnosti 0,17 cm olova oproti 0,3 cm železa.

Olovo

E = 0,5MeV	E = 0,8MeV	E = 1,0MeV	E = 1,5MeV	E = 2,0MeV
d = 0,17cm	d = 0,17cm	d = 0,17cm	d = 0,17cm	d = 0,17cm
$\mu = 1,64 \text{ cm}^{-1}$	$\mu = 0,945 \text{ cm}^{-1}$	$\mu = 0,711 \text{ cm}^{-1}$	$\mu = 0,579 \text{ cm}^{-1}$	$\mu = 0,516 \text{ cm}^{-1}$
I ₀ = 100%	I ₀ = 100%	I ₀ = 100%	I ₀ = 100%	I ₀ = 100%
$I = I_0 * e^{-\mu d}$	$I = I_0 * e^{-\mu d}$	$I = I_0 * e^{-\mu d}$	$I = I_0 * e^{-\mu d}$	$I = I_0 * e^{-\mu d}$
$I = 100 * e^{-0,655 * 0,3}$	$I = 100 * e^{-0,525 * 0,3}$	$I = 100 * e^{-0,470 * 0,3}$	$I = 100 * e^{-0,383 * 0,3}$	$I = 100 * e^{-0,335 * 0,3}$
I = 75,67%	I = 85,16%	I = 87,72%	I = 90,63%	I = 91,60%

Z vypočtených údajů je patrné, že pro nižší energie projde skrz 0,17 cm olova méně záření než 0,3 cm železa. Pro vyšší energie

je tomu naopak, skrz 0,17 cm olova projde méně záření, než skrze 0,3 cm železa.

Tabulka 14 srovnání ukazuje propustnost záření pro železo o různé tloušťce.

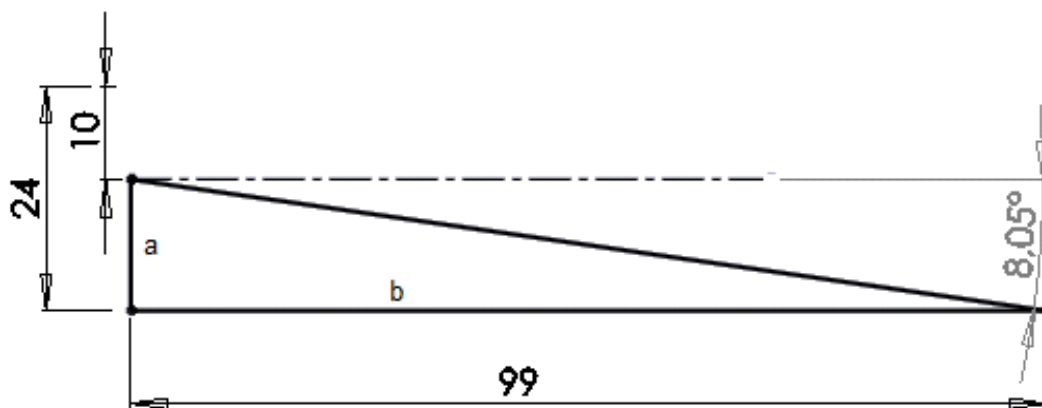
Tabulka 14: Prostupnost záření materiálem

Ploušťka	Materiál	0,5MeV	1MeV	1,5MeV
3 mm	Fe	82,16%	86,85%	89,15%
1 mm	Pb	84,90%	92,60%	94,40%
1,5 mm		78,20%	89,10%	91,70%
1,7 mm		75,67%	87,72%	90,63%
2 mm		72,03%	85,70%	89,10%

8.2.5. Výpočty pro nahrazení vrstvy železa vrstvou olova na čele stínění

Z předchozích výpočtů je patrné, že vrstvu železa silnou 0,3 cm lze přibližně nahradit vrstvou olova silnou 0,17 cm. Problém nastává na čelní stěně stínění, kde železná vrstva nedosahuje přesně až k okraji vstupu kolimátoru ale je od jeho středu vzdálená 2,5 cm. Toto přímé nahrazení vrstvy železa vrstvou olova se tedy bude týkat pouze kolimátoru s výřezem vysokým 5 cm, nikoli kolimátorů s výřezy o výšce 2 cm a 3 cm. Program *Genie - Geometry Composer* ovšem nenabízí možnost lépe členitého povrchu a udělat čelo stínění neúplné, tzn. nedosahující k hraně výřezu. Proto se při zachování výšky výřezu kolimátoru na čele a na vnitřní straně změni úhel, pod kterým je tento výřez vedený. Následující výpočty byly provedeny za účelem zjištění o kolik se tento úhel změni pro určité přidané tloušťky materiálu.

Následuje výpočet pro kolimátor s 2 cm vysokým vstupním otvorem:



Obr. P2.2: Úhel kolimátoru spodní stěny štěrbiny

Úhel se určí pomocí funkce tangens jako $\alpha = \text{tg}^{-1}\left(\frac{a}{b}\right)$. Pro výpočty jsou použity různé hodnoty přidaného materiálu:

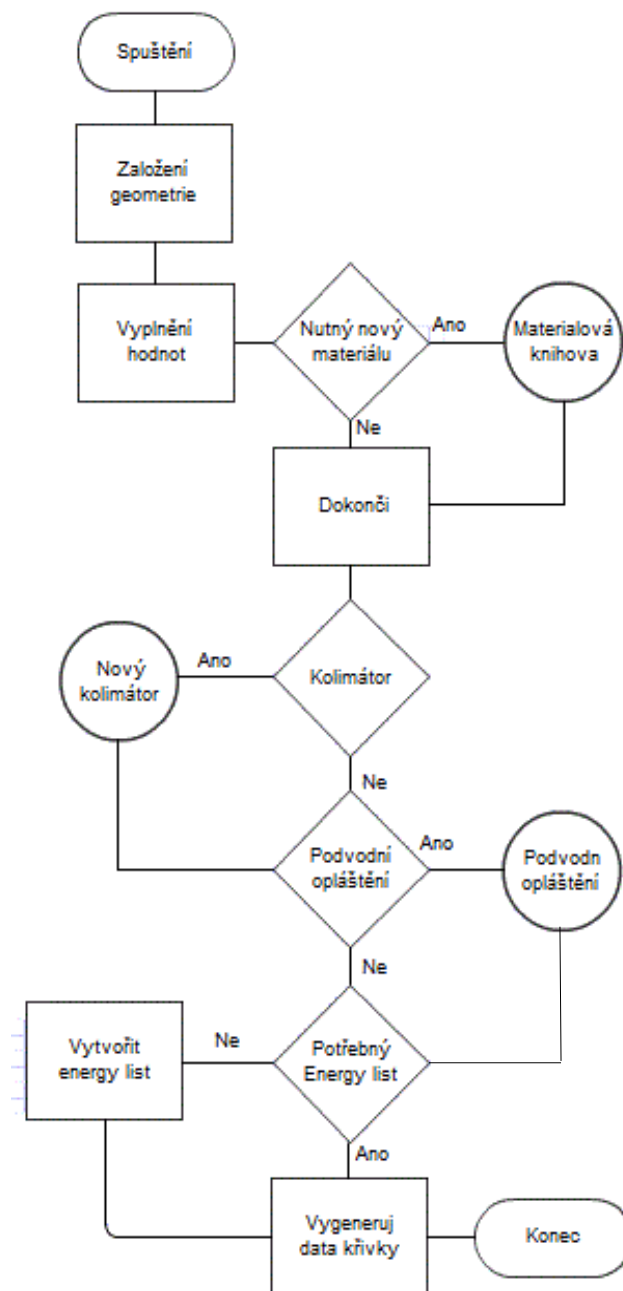
Přidáno 0,1 cm	Přidáno 0,15 cm	Přidáno 0,17cm
a = 1,4 cm	a = 1,4 cm	a = 1,4 cm
b = 10,00 cm	b = 10,05 cm	b = 10,07 cm
$\alpha = \text{tg}^{-1}(1,4 : 10)$	$\alpha = \text{tg}^{-1}(1,4 : 10)$	$\alpha = \text{tg}^{-1}(1,4 : 10)$
$\alpha = 7,97^\circ$	$\alpha = 7,93^\circ$	$\alpha = 7,91^\circ$

Jak je vidět z výpočtů, k příliš velké změně úhlu nedochází, ale z důvodů neúplného krytí čelní stěny stínění byla zvolena možnost přidání 0,15 cm olova.

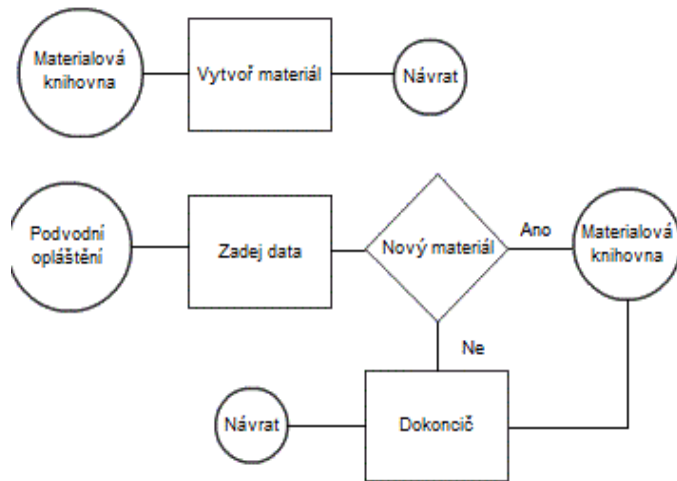
8.2.6. Vývojové diagramy pro jednotlivé část programu *Geometry Composer*

Ve vývojových diagramech ovály znázorňují start, popř. konec procesu, obdélníky značí průběh nějaké činnosti, kosočtverce označují rozhodovací část a kruhové značky jsou použité pro odskok do jiného vývojového diagramu, kdy po jeho dokončení se pokračuje opět v místě, kde se do tohoto jiného vývojového diagramu odskočilo. Např. při použití nového materiálu se „odskočí“ do vývojového diagramu materiálové knihovny a po skončení práce v ní se „vrátí“ do místa „odskoku“.

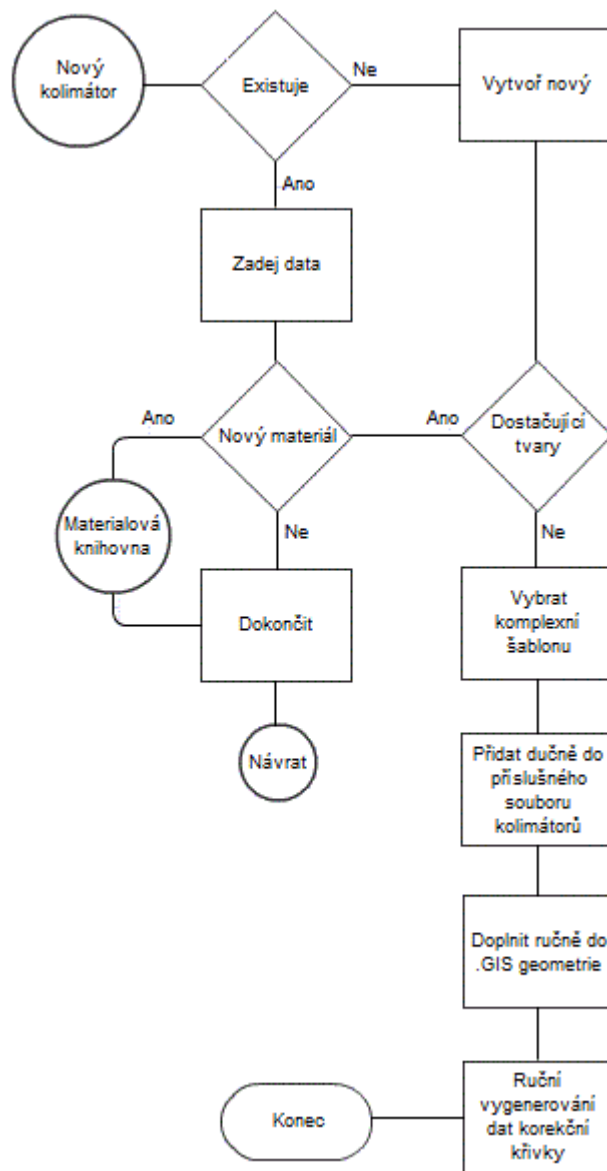
Vývojové diagramy jsou vypracované pro hlavní část programu *Geometry Composer* (Obr. P2.3), knihovnu materiálů a podvodní opláštění (Obr. P2.4) a kolimátory (Obr. P2.5).



Obr. P2.3: Vývojový diagram hlavní části programu

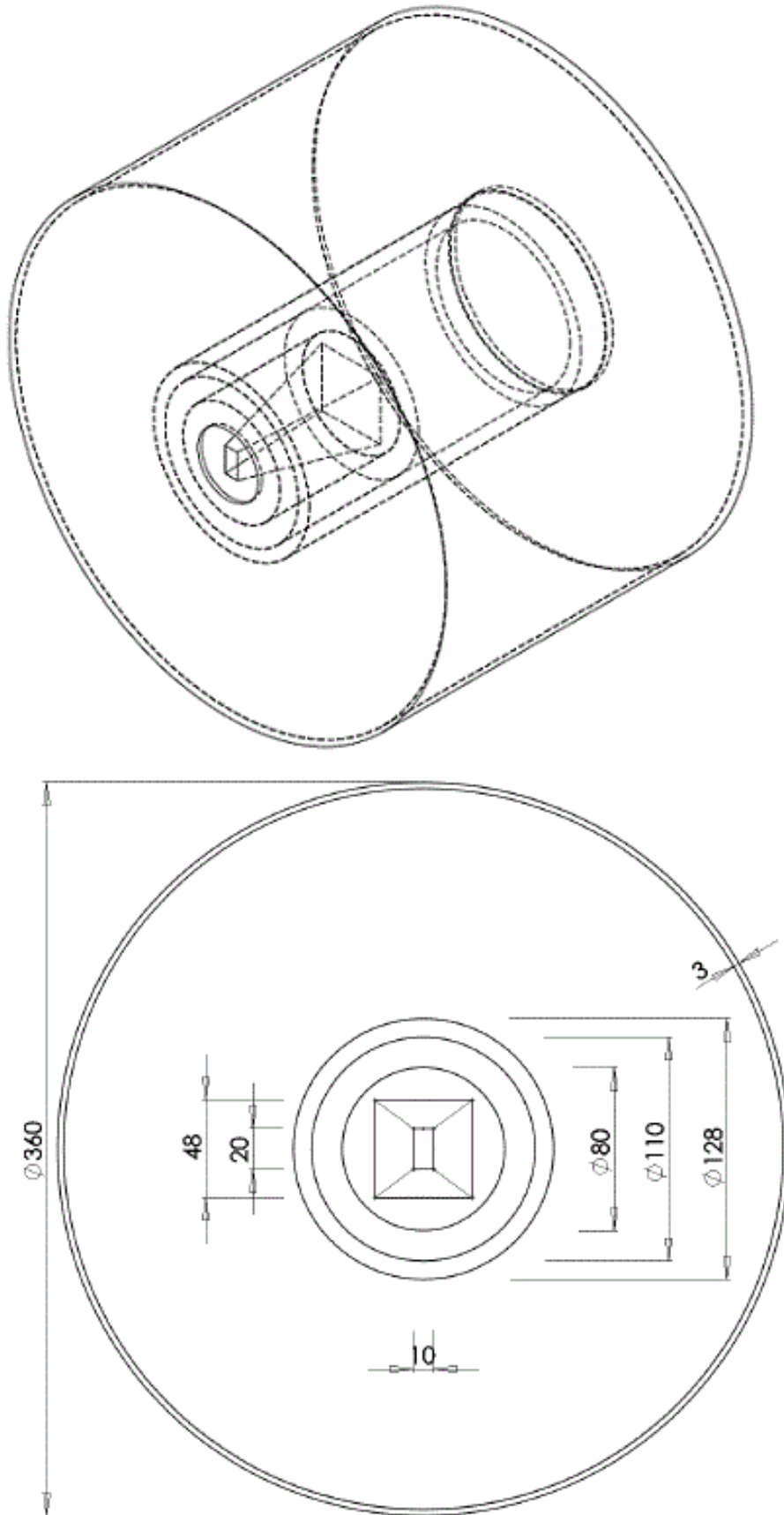


Obr. P2.4: Vývojový diagram práce s Materiálovou knihovnou a podvodním opláštěním

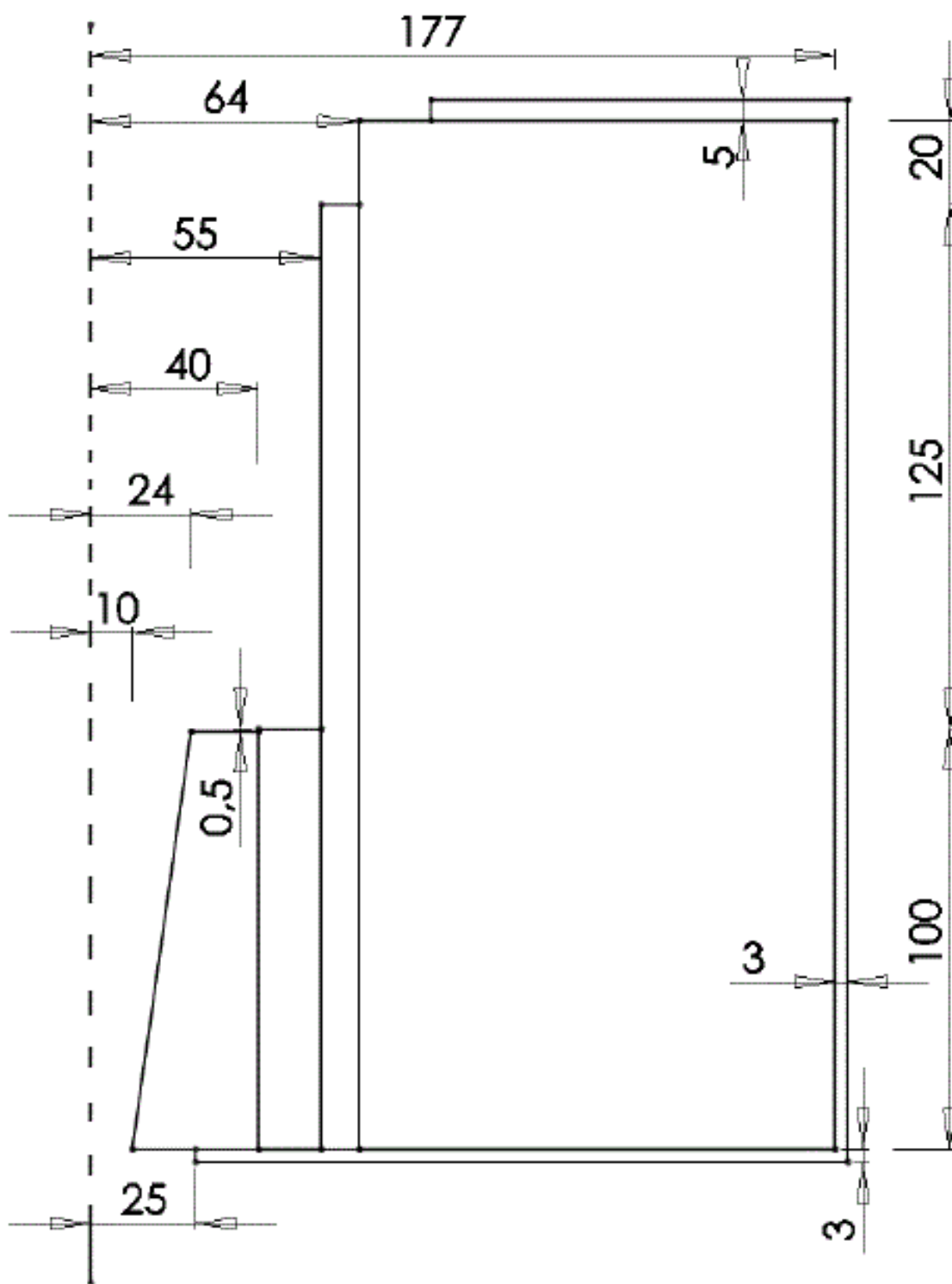


Obr. P2.5: Vývojový diagram práce s kolimátory

8.2.7. Nákrasy válcového stínění

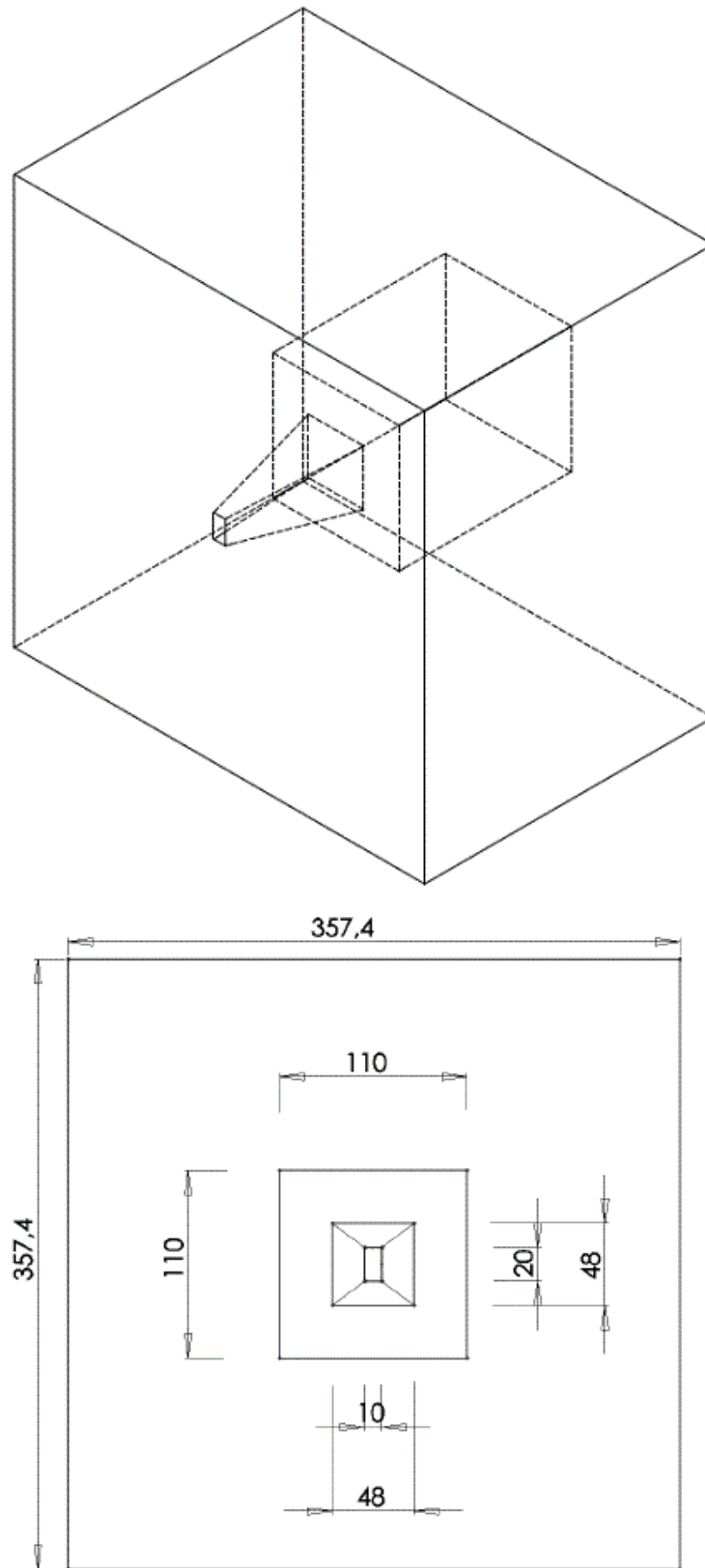


Obr. P2.6: Celkový pohled na válcové stínění a pohled zezadu

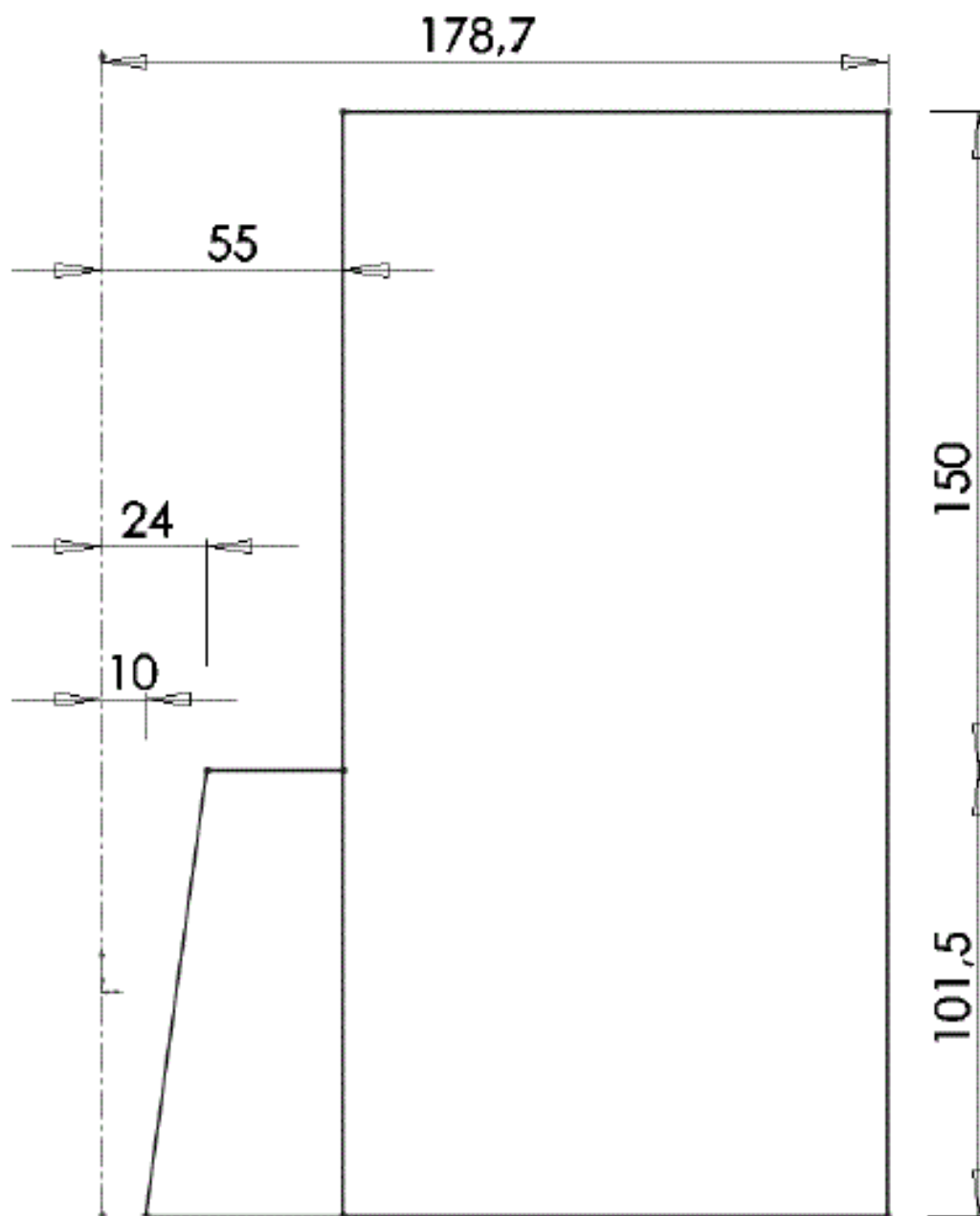


Obr. P2.7: Nákres jedné poloviny řezu z boku válcovým stíněním

8.2.8. Nákresy kvádrového stínění

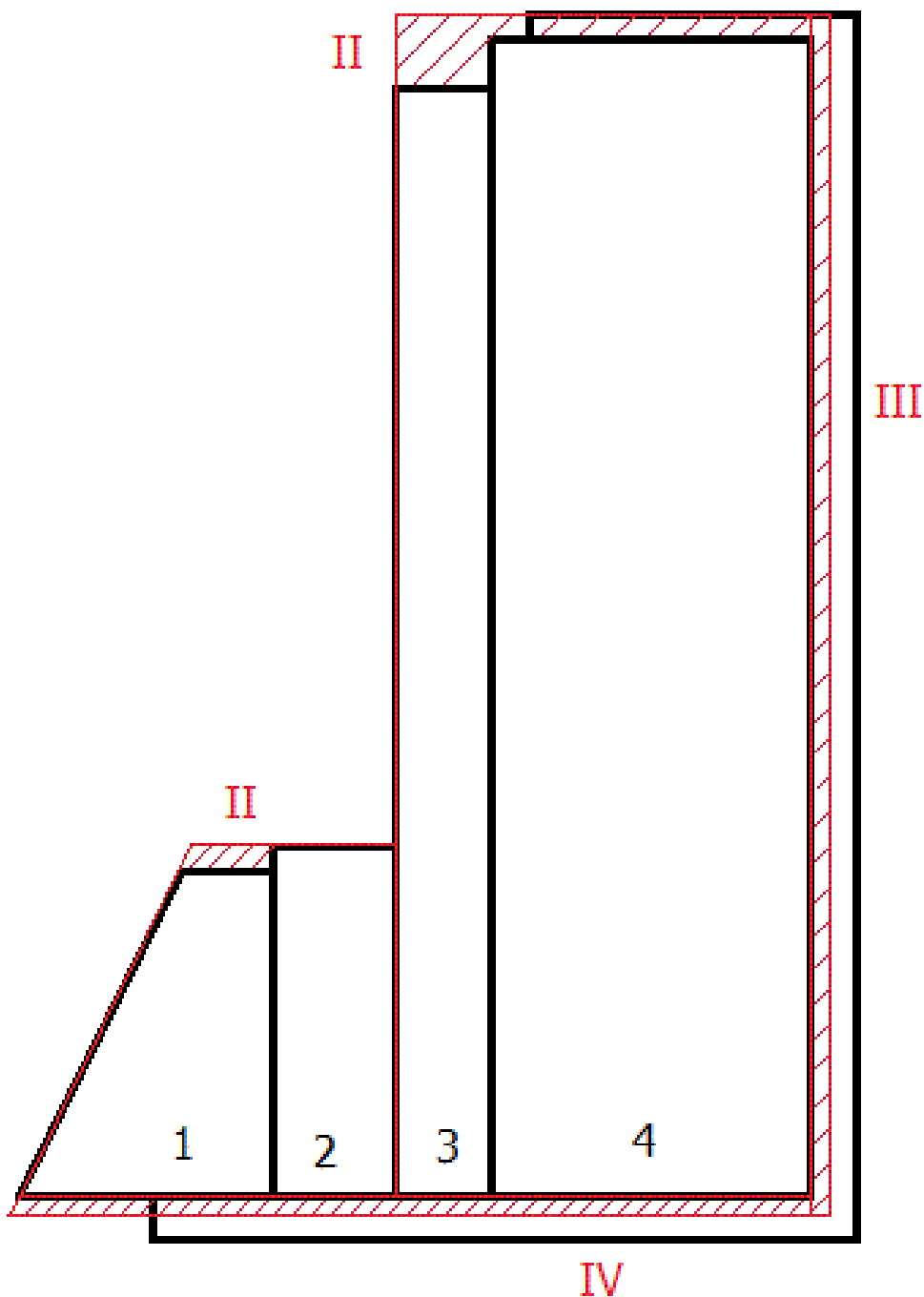


Obr. P2 8: Celkový pohled na aproximované stínění a pohled zezadu



Obr. P2.9: Náskres jedné poloviny řezu z boku kvádrovým stíněním

8.2.9. Nákres pro porovnání změn



Obr. P2.10: Znáornění provedených aproximací na stínění s kolimátorem

Červeně jsou označené změny vůči původním tvarům. Obrázek není v poměru ani měřítku, pro lepší znázornění změn.

Černé arabské číslice označují čísla vrstev olověného stínění, červené římské číslice označují provedené změny, kdy I. změna byla nahrazení tvaru stínění, II. změna byla zarovnání rozdílů rozměrů, III. byla nahrazení železného pláště olověnou vrstvou po obvodu a IV. je nahrazení železného pláště na čele stínění.

Seznam obrázků

Obr. 1: Procentuální zastoupení štěpných trosek ^{235}U	10
Obr. 2: Fotoefekt [12].....	11
Obr. 3: Úhlové rozložení uvolněných elektronů [13].....	11
Obr. 4: Comptonův rozptyl [12].....	12
Obr. 5: Úhlové rozložení odražených elektronů [13].....	12
Obr. 6: Úhlové rozložení rozptýlených fotonů [13].....	12
Obr. 7: Tvorba párů [12].....	13
Obr. 8: Porovnání šířky píků spekter detektory Ge(Li) a NaI(Tl) [14].....	14
Obr. 9: Cs tableta v ocelové kapsli [18].....	23
Obr. 10: Rozměry etalonu typu EG3. [19].....	23
Obr. 11: Vzhled etalonu typu EG. [19].....	23
Obr. P1.1: Schema a parametry reaktoru LR-0 [3].....	40
Obr. P1.2: Celkový pohled na zařízení pro gama-skenování palivových proutků a nákres palivového proutku [8].....	41
Obr. P1.3: Krabice s řídicí deskou a připojenými kabely [9].....	41
Obr. P1.4: Foto a náčrt stínění detektoru. [8].....	42
Obr. P1.5: Detektor ORTEC [8].....	43
Obr. P1.6: Řez detektorem s krystalem germánia	43
Obr. P1.7: Graf zobrazující počet zůstávajících jader v závislosti na čase.....	44
Obr. P2.1: Fázový diagram úhlového rozložení rozptýlených fotonů.....	51
Obr. P2.2: Úhel kolimátoru spodní stěny štěrbinu.....	54
Obr. P2.3: Vývojový diagram hlavní části programu.....	55
Obr. P2.4: Vývojový diagram práce s Materiálovou knihovnou a podvodním opláštěním....	56
Obr. P2.5: Vývojový diagram práce s kolimátory.....	56
Obr. P2.6: Celkový pohled na válcové stínění a pohled zezadu.....	57
Obr. P2.7: Nákres jedné poloviny řezu z boku válcovým stíněním.....	58
Obr. P2.8: Celkový pohled na aproximované stínění a pohled zezadu.....	59
Obr. P2.9: Nákres jedné poloviny řezu z boku kvádrovým stíněním.....	60
Obr. P2.10: Znázornění provedených aproximací na stínění s kolimátorem.....	61

Seznam tabulek

Tabulka 1: Složení palivového proutků	22
Tabulka 2: Materiálové složení Cs tablety a ocelové kapsle [18].....	23
Tabulka 3: Srovnání vypočtených aktivit s certifikovanými hodnotami různých radionuklidů etalonů EG3 - 3 cm štěrbinou kolimátoru.....	27
Tabulka 4: Srovnání vypočtených aktivit s certifikovanými hodnotami různých radionuklidů etalonů EG3 - 2 cm štěrbinou kolimátoru.....	28
Tabulka 5: Srovnání vypočtených korigovaných a nekorigovaných aktivit césiové tablety s certifikovanou hodnotou aktivity $870 \text{ kBq} \pm 1,5\%$	28
Tabulka 6: Srovnání aktivit vybraných radionuklidů v tabletě UO_2 pro kolimátor 2 cm.....	29
Tabulka 7: Srovnání hodnot aktivit pro štěrbinu 2 cm a 3 cm.....	29
Tabulka 8: Měření aktivit vybraných radionuklidů v palivovém proutku s UO_2	30
Tabulka 9: Tabulka porovnání výpočtů s a bez aproximace stínění.....	30
Tabulka 10: Hodnoty pro graf 7 a výpočty odchylek hodnot účinností mezi MCNP a ISOCS pro geometrii palivového proutku.....	35
Tabulka 11: Lineární koeficient součinitele zeslabení $\mu [\text{cm}^{-1}]$ pro různé materiály a energie fotonů záření gama [20].....	51
Tabulka 12: Koeficienty součinitele lineárního zeslabení pro vybrané materiály.....	52
Tabulka 13: Tabulky pro porovnání koeficientu lineárního zeslabení vybraných energií a materiálů a jejich poměru.....	52
Tabulka 14: Prostupnost záření materiálem.....	53

Seznam grafů

Graf 1: Porovnání kalibračních křivek pro etalony EG3 se štěrbinou kolimátoru 2 cm.....	31
Graf 2: Porovnání kalibračních křivek pro etalony EG3 se štěrbinou kolimátoru 3 cm.....	31
Graf 3: Porovnání kalibračních křivek pro Cs tabletu se štěrbinou kolimátoru 2 cm.....	32
Graf 4: Porovnání kalibračních křivek pro Cs tabletu se štěrbinou kolimátoru 3 cm.....	32
Graf 5: Porovnání kalibračních křivek pro UO_2 tabletu se štěrbinou kolimátoru 2 cm.....	33
Graf 6: Porovnání kalibračních křivek pro palivový proutek se štěrbinou 2 cm.....	33
Graf 7: Porovnání korekčních křivek vytvořených pomocí MCNP a ISOCS.....	34
Graf 8: Graf postupné změny poměru lineárního koeficientu zeslabení μ	52