

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ  
PRÁCE**

**2019**

**TOMÁŠ  
PELTAN**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Peltan** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **437402**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**  
Studijní program: **Jaderná energetická zařízení**  
Studijní obor: **Jaderná energetická zařízení**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Ověření materiálového parametru reaktoru typu HTGR**

Název diplomové práce anglicky:

**Verification of HTGR reactor material parameter**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s integrálními experimenty na LR-0
2. Seznamte se s aplikací scintilační spektrometrie v grafitovém prostředí
3. Namodelujte studované geometrie ve vhodném výpočetním kódu
4. Sestavte experimenty na pracovištích LR-0 a LSNM
5. Vyhodnoťte výsledky a stanovte závěry

Seznam doporučené literatury:

Knoll G. F.: Radiation Detection and Measurement, 4th Edition, 2010  
Lewis E.E.: Fundamentals of Nuclear Reactor Physics, 1st Edition, 2008

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Jan Prehradný, Ph.D., ústav energetiky FS**

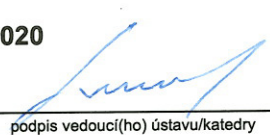
Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:


Datum zadání diplomové práce: **08.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.06.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2020**

  
Ing. Jan Prehradný, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce


  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

  
24. 4. 2019  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

### Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně, že jsem řádně citoval všechny použité prameny a literaturu, a že práce nebyla využita v rámci jiného vysokoškolského studia či k získání jiného nebo stejného titulu.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této práce, je legální.

V Praze dne 3. 6. 2019

.....

Bc. Tomáš Peltan

## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Janu Prehradnému, Ph.D. za vedení práce a cenné rady, které pomohly při její tvorbě. Velké díky patří konzultantovi práce Ing. Michalovi Košťálovi Ph.D., který přispěl cennými radami, konzultacemi a velice tak pomohl se zhotovením této práce.

Poděkování patří i Ing. Evženovi Losovi Ph.D., který pomohl s výpočtním kódem Serpent a se zpracováním vypočtených dat.

Bc. Tomáš Peltan

**Autor: Bc. Tomáš Peltan**

**Název práce: Ověření materiálového parametru reaktoru typu HTGR**

**Ústav / Obor: Ústav energetiky / Jaderná energetická zařízení**

**Druh práce: Diplomová práce**

**Vedoucí práce: Ing. Jan Prehradný, Ph.D.**

Ústav energetiky, FS ČVUT v Praze

**Konzultanti: Ing. Michal Košťál, Ph.D.**

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

**Anotace:**

Předkládaná práce se zabývá ověřením neutronických vlastností reaktorového grafitu, který má být v budoucnu využíván pro reaktory IV. generace, konkrétně pro reaktor HTGR. Práce obsahuje podrobný popis pracoviště, kde byly prováděny vyhodnocované experimenty - reaktor LR-0 a laboratoře LSM. Dále je popsána scintilační spektrometrie se stilbenovým detektorem, který byl využit při všech experimentech. V práci nalezneme rovněž popis sestavených experimentů jejich modelové ekvivalenty ve výpočetních kódech MCNP a Serpent. V závěru práce je porovnání a zhodnocení experimentálních a výpočetních výsledků.

**Klíčová slova:** Reaktorový grafit, reaktor LR-0, kód Serpent, kód MCNP, stilbenový scintilační detektor, neutronové spektrum

Author: **Bc. Tomáš Peltan**

Title: **Verification of HTGR reactor material parameter**

Abstract:

The present work deals with the verification of neutronic properties of reactor graphite, which should be used in the future for reactors IV. generation, specifically for the HTGR reactor. The thesis contains a detailed description of the workplace where the evaluated experiments were performed - the LR-0 reactor and the LSM laboratory. Further, stilbene detector scintillation spectrometry is described, which was used in all experiments. We also find a description of assembled experiments with their model equivalents in the calculation codes MCNP and Serpent. In conclusion, there is a comparison and evaluation of experimental and computational results.

Key words: Reactor grade graphite, reactor LR-0, Serpent code, MCNP code, stilbene scintillation detector, neutron spectrum

# Obsah

<b>Seznam zkratek .....</b>	<b>9</b>
<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>10</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>12</b>
<b>Seznam příloh.....</b>	<b>13</b>
<b>Úvod.....</b>	<b>14</b>
<b>1. Seznámení se s integrálními experimenty na LR-0.....</b>	<b>16</b>
1.1 Popis reaktoru LR-0 .....	16
1.1.1 Nádoba reaktoru.....	16
1.1.2 Palivo reaktoru LR-0.....	18
1.1.3 Parametry aktivní zóny reaktoru LR-0.....	21
1.1.4 Řízení a řídicí systém reaktoru LR-0 .....	22
1.1.5 Řídicí systém LR-0 .....	24
1.1.6 Pomocné systémy a experimentální vybavení reaktoru LR-0.....	25
1.2 Integrální experimenty .....	25
<b>2. Aplikace scintilační spektrometrie v grafitovém prostředí .....</b>	<b>27</b>
2.1 Anorganické scintilátory .....	28
2.1.1 Princip funkce anorganického scintilátoru .....	28
2.2 Organické scintilátory .....	29
2.2.1 Princip funkce scintilátoru.....	30
2.3 Scintilační materiál Stilben.....	31
2.3.1 Popis detekční aparatury .....	33
<b>3. Namodelování studovaných geometrií ve vhodném výpočetním kódu.....</b>	<b>36</b>
3.1 Výpočetní kódy v neutronové fyzice .....	36
3.1.1 Stochastické výpočetní kódy a Monte Carlo kódy .....	36
3.2 Modelované geometrie .....	38

3.2.1	Modelování grafitové krychle.....	38
3.2.2	Vložná grafitová zóna v reaktoru LR-0.....	44
<b>4.</b>	<b>Sestavení experimentů na pracovištích LR-0 a LSNM .....</b>	<b>46</b>
4.1	Popis experimentu s grafitovou krychlí.....	46
4.1.1	Neutronový zdroj $^{252}\text{Cf}$ .....	47
4.1.2	Sestavení grafitové krychle .....	47
4.1.3	Realizace a průběh měření s grafitovou krychlí .....	47
4.2	Popis experimentu s vložnou zónou v reaktoru LR-0.....	49
4.2.1	Grafitová vložná prisma .....	49
4.2.2	Realizace a průběh měření s vložnou grafitovou zónou .....	50
<b>5.</b>	<b>Vyhodnocení experimentů a výpočtů .....</b>	<b>52</b>
5.1	Grafitová krychle .....	52
5.2	Grafitová vložná zóna LR-0 .....	57
<b>Závěr.....</b>		<b>62</b>
<b>Reference .....</b>		<b>64</b>
<b>Přílohy .....</b>		<b>1</b>



## Seznam zkratek

ANSI-C	jazyk C publikovaný pod hlavičkou ANSI
AVR	<i>Arbeitsgemeinschaft Versuchreaktor</i> - německý reaktor s kulovým grafitovým palivem
AZ	aktivní zóna
HTGR	<i>high temperature graphite reactor</i> – vysoko teplotní grafitový reaktor
keV	kiloelektronvolt
LaP	limity a podmínky
LR-0	lehkovodní reaktor nulového výkonu v CV Řež
LSNM	laboratoř spektrometrie a neutronových měření
LWR	<i>light water reactor</i> - lehkovodní reaktor
MAC OS	operační systém
MCNP	Monte Carlo N Particle – výpočetní kód
MeV	megaelektronvolt
MSR	<i>Molten Salt Reactor</i> – reaktor s roztavenými solemi
NVO	nezávislá výkonová ochrana
OZ	ovládací zařízení reaktoru LR-0
PMV	provozní měření výkonu
PS	palivový soubor
PWR	<i>pressurized water reactor</i> - tlakovodní reaktor
RBMK	<i>Реактор Большой Мощности Канальный</i> – lehkou vodou chlazený grafitem moderovaný reaktor
ŘP	řídící počítač
VVER	vodo-vodní energetický reaktor

## Seznam obrázků

Obr. 1. Schéma reaktoru LR-0 [2] .....	18
Obr. 2. Palivový proutek LR-0 [2] .....	19
Obr. 3. Palivová kazeta LR-0 [2], 1-hlavice absorpčního klastru; 2-hlava kazety; 3-palivové proutky; 4-distanční mřížka; 5-vodící trubky klastrů; 6-aretační kolík; 7-patice kazety.....	19
Obr. 4. Rozložení klastrů v palivové kazetě; A-regulární, B-standardní [5] .....	20
Obr. 5. Rozložení a umístění nosných desek a konstrukcí pro sestavování libovolné AZ [2] .....	22
Obr. 6. Grafické porovnání tvaru štěpných spekter $^{235}\text{U}$ a $^{252}\text{Cf}$ v závislosti na energii E a pravděpodobnosti emise .....	26
Obr. 7. Princip vzniku scintilačního fotonu v anorganickém materiálu dopovaný aktivátorem. Překresleno z [9] .....	29
Obr. 8. Mechanismus vzniku scintilačních fotonů v organickém scintilátoru formou fluorescence a fosforescence. Překresleno z [9] .....	30
Obr. 9. Detekční sonda se stilbenovým krystalem používaná pro měření spekter neutronů na pracovištích LR-0 a LSNM .....	32
Obr. 10. Schéma dvouparametrického digitálního detekčního řetězce s detektorem a analyzátozem FD-11. Překresleno z [10] .....	34
Obr. 11. Schématické znázornění průběhu detekovaného signálu s naznačenými vstupními parametry diskriminace signálu. Překresleno z [10] .....	35
Obr. 12. Nákres reálného zdroje s rozměry a s potrubní poštou (vlevo), namodelovaný komplet zdroj v Serpentu (vpravo).....	39
Obr. 13. Namodelovaná laboratoř LSNM s měřenou grafitovou kostkou s umístěním detektoru a detailem vnitřku grafitové kostky .....	40
Obr. 14. Bokorys (nahore) a půdorys (dole) modifikované modelované geometrie .....	41
Obr. 15. Nákres modelu neutronového zdroje s potrubní poštou v kódu MCNP .....	42
Obr. 16. Model laboratoře LSNM s měřenou grafitovou kostkou s umístěním detektoru a detailem vnitřku grafitové kostky .....	43
Obr. 17. Schématický nákres modelované AZ s vložitelným grafitovým kanálem [21] .....	44
Obr. 18. Průřez modelovanou AZ, červená zobrazuje grafitový vložitelný kanál [21] .....	45
Obr. 19. Pohled do laboratoře se stínícím kontejnerem neutronového zdroje $^{252}\text{Cf}$ (oranžový sud vlevo) .....	46

Obr. 20. Umístění aktivačních fólií na povrchu krychle (vlevo) a zavěšení krychle ve speciálním látkovém závěsu společně s potrubní poštou (vpravo) .....	48
Obr. 21. Schématické seskupení měření zpětných odrazů a celkového pozadí.....	49
Obr. 22. Fotografie grafitových bloků – vlevo uspořádání v kanále, uprostřed pohled na celý blok, vpravo pohled na blok shora.....	50
Obr. 23. Pohled na uspořádání AZ reaktoru LR-0 při experimentech s vložnou grafitovou zónou .....	51
Obr. 24. Neutronová spektra z grafitové krychle v různých jaderných knihovnách vypočtena pomocí kódu Serpent 2.30. – neupravena konvolucí .....	53
Obr. 25. Neutronová spektra z grafitové krychle v různých jaderných knihovnách vypočtena pomocí kódu Serpent 2.30. – upravena konvolucí .....	54
Obr. 26. Porovnání C/E-1 různých jaderných knihoven programem Serpent .....	54
Obr. 27. Neutronová spektra z grafitové krychle v různých jaderných knihovnách vypočtena pomocí kódu MCNP 6.1. – neupravena konvolucí na detektor .....	55
Obr. 28. Neutronová spektra z grafitové krychle v různých jaderných knihovnách vypočtena pomocí kódu MCNP 6.1. – upravena konvolucí.....	56
Obr. 29. Porovnání C/E-1 různých jaderných knihoven programem MCNP.....	56
Obr. 30. Vypočtená neutronová spektra ve vložné zóně LR-0 v různých jaderných knihovnách vypočtena pomocí kódu MCNP 6.1. – neupravena konvolucí na detektor .	58
Obr. 31. Vypočtená neutronová spektra ve vložné zóně LR-0 v různých jaderných knihovnách vypočtena pomocí kódu MCNP 6.1. – upravena konvolucí na detektor.....	59
Obr. 32. Porovnání C/E-1 různých jaderných knihoven programem MCNP pro vložnou grafitovou zónu LR-0 .....	59
Obr. 33. Porovnání obou typů experimentů, C/E-1 grafitové kostky (modrá křivka) a C/E-1 vložné zóny LR-0 (červená křivka) [17] .....	61

## Seznam tabulek

Tab. 1. Technické parametry paliva LR-0 [6] .....	19
Tab. 2. Hlavní vlastnosti krystalu stilbenu [13] .....	31

## Seznam příloh

<b>Příloha A:</b>	Vstupní soubor kódu Serpent2.30.....	1
<b>Příloha B:</b>	Porovnání jednotlivých knihoven a experimentu v kódech MCNP 6.1. a Serpent 2.30.....	10

## Úvod

Cílem této práce je ověření neutronických vlastností reaktorového grafitu. Jedná se o ověření, zda jaderné knihovny, které se používají při návrzích, bezpečnostních výpočtech aktivních zón a dalších neutronově-fyzikálních výpočtech, poskytují dostatečně přesné hodnoty účinných mikroskopických průřezů, které přímo souvisí a s hustotou toku neutronů v aktivních zónách grafitových reaktorů.

Reaktorový grafit hraje již od minulosti velmi významnou roli v různých konceptech energetických reaktorů. V minulosti byl používán ke konstrukci nechvalně známých reaktorů RBMK, byl rovněž používán v anglických reaktorech MAGNOX či v německém projektu AVR, tedy v prvním *pebble bed* reaktoru. V dnešní době se pomalu připravujeme na éru reaktorů IV. generace, kde se vyskytuje 6 koncepcí, které mají potenciální využití jako energetické reaktory. Dva z těchto konceptů využívají grafit jako moderátor – HTGR a MSR, a proto je každé zpřesňování fyzikálních parametrů reaktorového grafitu žádoucí. I když byl grafit hojně využívaným materiálem, stále se zde nachází neurčitosti v jeho chování ve spojení s novými technologiemi.

Reaktorový grafit se od klasického přírodního grafitu velice liší, hlavně svými fyzikálními parametry. Grafit jako takový můžeme označit za grafit reaktorových vlastností, pokud je jeho hustota minimálně  $1.5 \text{ g/cm}^3$  a pokud je jeho tzv. bórový ekvivalent nižší než 5 ppm [1]. To v praxi znamená, že grafit musí být nukleární čistoty bez ostatních příměsí, a i malé množství bóru může grafit znehodnotit. Tato práce se zabývá právě zkoumáním neutronických vlastností reaktorového grafitu.

První část práce je zaměřena na seznámení se s pracovištěm reaktoru LR-0, kde byly realizovány experimenty. Detailní popis celého reaktoru je potřebný pro pochopení celého experimentu. Při experimentech bylo měřeno neutronové spektrum, které bylo dále vyhodnocováno a později vypočteno pomocí výpočetních kódů. Všechna měření neutronových spekter byla prováděna scintilačním stilbenovým detektorem.

Princip funkce obecně scintilačních materiálu, jejich použití a rozdělení je detailněji popsáno v druhé části této práce. Tato část práce se zprvu zaměřuje na popis scintilačních materiálů, na objasnění, jak organické scintilátory mohou detekovat neutrony, a nakonec je zde detailně popsán samotný materiál stilben a celý detekční řetězec, kterého bylo využito pro měření.

Ve třetí části se čtenář seznámí s výpočetními kódy využívané v neutronové a reaktorové fyzice. V krátkosti jsou představeny výpočetní kódy Serpent 2.30 a MCNP 6.1., kterých bylo využito pro výpočty. Dále se zde čtenář dozví detailní popis sestavených modelů v kódech Serpent a MCNP jak pro experiment s grafitovou krychlí, tak i pro experiment s vložnou grafitovou zónou v reaktoru LR-0. Jsou zde popsány vstupní soubory a parametry, které jsou klíčové pro dané výpočty.

Čtvrtá část práce je věnována popisu samotných experimentů. Jsou zde postupně detailně popsány oba experimenty. Čtenář získá přehled o obou geometriích, popis měřené geometrie a celkové uspořádání s pozicí detektoru.

Závěr této práce je zaměřen na reprodukci získaných výsledků, kterých bylo dosaženo výpočetními kódy a jednotlivými experimenty.

## 1. Seznámení se s integrálními experimenty na LR-0

Pracoviště reaktoru LR-0 slouží k celé řadě experimentálních činností, zejména k integrálním experimentům v různých modifikacích. Reaktor LR-0 je lehkovodní výzkumný jaderný reaktor bazénového typu nulového výkonu. Slouží k experimentální činnosti a vědecko-technické podpoře našich jaderných elektráren. LR-0 poskytuje zázemí pro experimenty z širokého pole neutronové a reaktorové fyziky, které souvisí např. se skladováním vyhořelého jaderného paliva, testováním stínění či k různým experimentům na zónách reaktorů VVER-1000 a VVER-440. Slouží k validaci a ověření výpočetních kódů, které se uplatňují při provozu energetických reaktorů pro modelování vsázek paliva či k měření výkonu a formování bezpečnostních analýz a zpráv. Díky variabilitě paliva lze sestavit libovolné konfigurace AZ, které mohou napodobovat i zóny reaktorů PWR [2].

### 1.1 Popis reaktoru LR-0

Reaktor byl vybudován v šedesátých letech, a to původně jako těžkovodní reaktor TR-0, který sloužil pro podporu výzkumu a provozu prvního energetického československého jaderného reaktoru KS-150. Ten byl prototypově zkonstruován a provozován v Jaslovských Bohunicích. V sedmdesátých letech byl provoz těžkovodního reaktoru TR-0 ukončen a reaktor byl přestaven do dnešní podoby na lehkovodní reaktor nulového výkonu LR-0 [3]. Detailnější specifikace jednotlivých částí reaktoru bude popsána níže.

#### 1.1.1 Nádoba reaktoru

Nádoba reaktoru je klíčovou součástí jaderného reaktoru. Pro reaktor LR-0 byla využita původní nádoba reaktoru TR-0, proto jsou její rozměry relativně velké. Nádoba je vyrobena z velmi čistého hliníku (čistota materiálu je 99.5 %) ze dvou navzájem svařených částí. Spodní část válcové nádoby má rozměry: průměr 3.5 m, výška 6.5 m a tloušťkou stěny 16 mm, přičemž dno nádoby má zesílenou tloušťku stěny na 25 mm. Dno je opatřeno třemi hrdly, každé o průměru 200 mm. Tyto hrdla se používají k napouštění a vypouštění moderátoru z nádoby – dvě pro odtok moderátoru, jedno pro napouštění. Horní čtvercová část reaktorové nádoby o rozměrech 6x6 m a výškou 1.5 m je svařena s dolní částí v jeden celek. Vrchní čtvercovou vodorovnou stěnu tvoří odnímatelné čtvercové víko reaktoru. Ve středu tohoto čtvercového víka je kruhový otvor o průměru



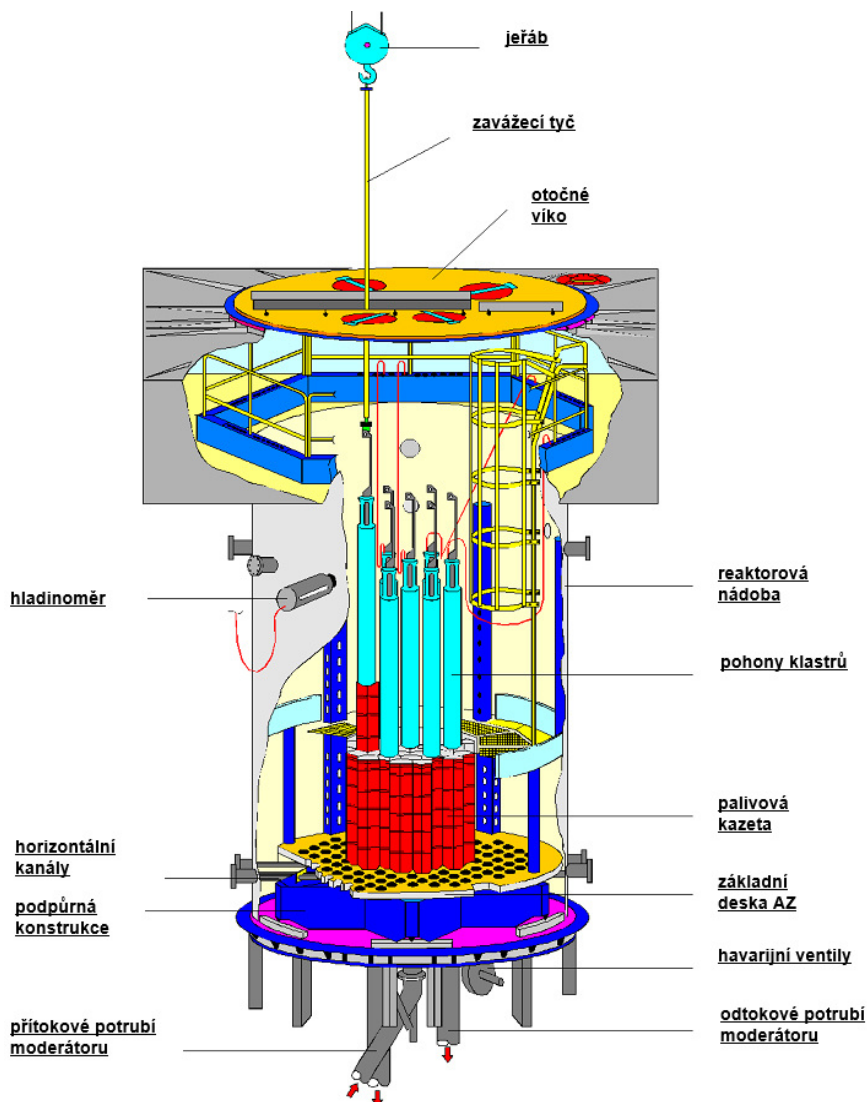
3.5 m, který je zakryt kruhovým otočným víkem. Toto kruhové víko tvoří vlastní víko reaktoru, ve kterém se nachází více vstupních otvorů, pomocí kterých se do reaktoru spouští palivo (velký obdélníkový otvor). Dále se ve víku nachází další otvory sloužící k průlezu osob do reaktoru na žebřík, který umožňuje sestup až na nosnou desku AZ [2].

Celá nádoba je umístěna v železobetonovém stínícím bunkru, který zajišťuje dostatečné stínění i při maximálním výkonu reaktoru. Vnější část válcové nádoby je překryta 1mm kadmiovými plechy, které fungují jako stínění tepelných neutronů. Stěna nádoby je opatřena tepelnou odnímatelnou izolací s tloušťkou 100 a 200 mm. Stěny stínícího bunkru v radiálním směru jsou z těžkého betonu o tloušťce 1.2 m. Víko reaktoru překrývá pojízdná stínící plošina, která přímo navazuje na stěny stínícího bunkru. Tato plošina je složena ze dvou navzájem do sebe zapadajících kusů stínění, které se při provozu reaktoru přirazí k sobě a vytvoří jednu velkou stínící desku nad reaktorem. Stínící plošina slouží zároveň jako podlaha části haly reaktoru LR-0. Tloušťka této stínící desky je 55 cm a je rovněž vyrobena z těžkého betonu [2].

Reaktorová nádoba v sobě obsahuje další komponenty tzv. reaktorové vestavby, které jsou nezbytnou součástí pro provoz reaktoru, zejména se jedná o tyto části:

- nosná konstrukce aktivní zóny
- horizontální a vertikální kanály měření hustoty toku neutronů
- hladinoměry
- osvětlení aktivní zóny
- zařízení neutronového zdroje
- plošiny a obslužné žebříky uvnitř reaktorové nádoby
- přítokové a odtokové potrubí moderátoru
- víko reaktoru

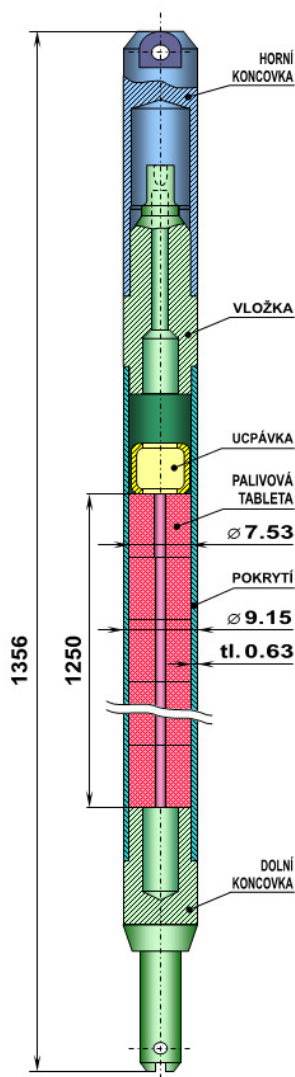
Zjednodušený náčrt reaktoru LR-0 a jeho vnitřních vestaveb je zobrazen na *Obr. 1*. Díky tomuto uspořádání a velikosti reaktoru lze v AZ provádět mnoho experimentů s vloženými kanály či s ozařovacími pouzdry. Variabilita AZ navíc umožňuje simulovat parametry i jiných typů reaktorů než jen v LWR. Detailnější popis některých reaktorových vestaveb, a především jaderného paliva, se nachází níže v následující části práce.



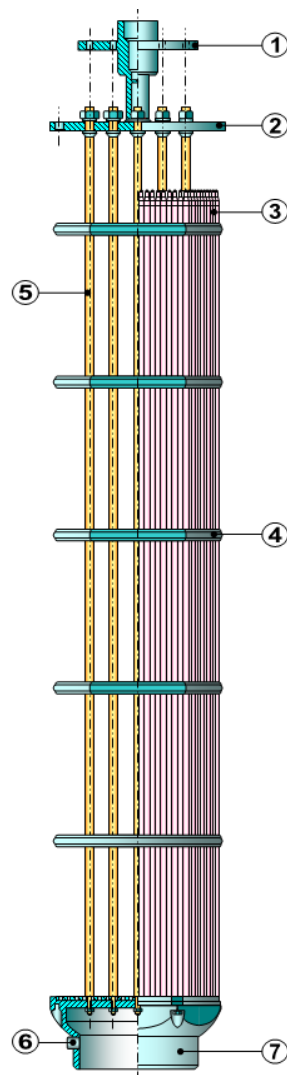
Obr. 1. Schéma reaktoru LR-0 [2]

### 1.1.2 Palivo reaktoru LR-0

Palivem reaktoru LR-0 jsou zkrácené palivové proutky velice podobné palivovým proutkům, které se dnes využívají v reaktorech VVER 440 a VVER 1000. Vnější rozměry a konstrukčními materiály jsou identické s palivovými proutky původních ruských proutků. Proutky jsou tvořeny tabletami sintrovanými z práškového  $\text{UO}_2$ , které jsou uzavřeny v zirkoniových hermetických trubičkách [2]. Celková délka těchto trubiček je 1350 mm, přičemž vnější průměr trubičky je 9.15 mm s tloušťkou stěny 0.72 mm viz Obr. 2.



Obr. 2. Palivový proutek LR-0 [2]



Obr. 3. Palivová kazeta LR-0 [2], 1-hlavice absorpčního klastru; 2-hlava kazety; 3-palivové proutky; 4-distanční mřížka; 5-vodící trubky klastrů; 6-aretační kolík; 7-patice kazety

Palivové proutky mají různé obohacení, od přírodního uranu po obohacení 4.4 %  $^{235}\text{U}$ . Za pomoci těchto proutků lze sestavit jakkoli obohacené palivové soubory s různou profilací rozložení obohacených proutků – palivové kazety lze sestavit přesně podle požadavků experimentu. Souhrnné parametry palivových proutků jsou vypsány v Tab. 1.

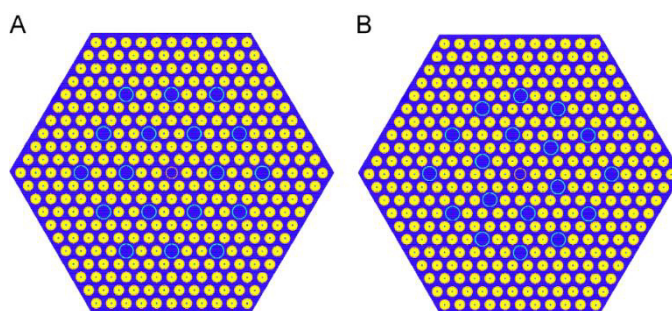
Z palivových proutků se za pomoci nosného skeletu, distančních mřížek, vodících trubek a centrální trubky sestavují palivové kazety buď VVER-440 nebo VVER-1000. Takto sestavené palivo má trojúhelníkovou geometrii, která je typická pro reaktory

VVER – tzv. „východní koncepce“. Pro sestavení palivového souboru VVER-1000 (kterých se pro experimenty využívá nejvíce) je zapotřebí 312 palivových proutků, pro palivovou kazetu VVER-440 jen 126 palivových proutků [4]. V každém palivovém souboru VVER-1000 je 18 nerezových vodících trubek s  $\varnothing 12.6$  mm a tloušťkou stěny 0.8 mm, které slouží pro vedení absorpčních elementů klastru. V horní části vodících trub je upevněna hlavice kazety, dole patka kazety. Tyto elementy společně s distančními mřížkami zabezpečují přesné umístění vodících trub v palivovém souboru [2]. Schéma palivové kazety je na Obr. 3. Souhrnné parametry palivových proutků jsou vypsány v Tab. 1.

Tab. 1. Technické parametry paliva LR-0 [2] [6]

Průměr palivové pelety [mm]	7.15
Průměr dutiny v peletě [mm]	1.4
Tloušťka pokrytí proutku [mm]	0.72
Vnější průměr pokrytí proutku [mm]	9.15
Materiál pokrytí	Zr + 1% Nb
Délka proutku celková [mm]	1350
Délka palivové náplně [mm]	1250
Krok mříže proutků v palivu [mm]	12.7
Obohacení $^{235}\text{U}$ [%]	1.6%; 2%; 2.4%; 3%; 3.3%; 3.6%; 4.4%
Krok mříže s palivem VVER 1000 [mm]	236
Krok mříže s palivem VVER 440 [mm]	147
Hmotnost $\text{UO}_2$ v proutku [g]	$560 \pm 20$

Maketa paliva VVER-1000 používaného na LR-0 má dvě modifikace rozmístění absorpčních elementů v PS – standardní (stejně jako v energetické kazetě) nebo regulární



Obr. 4. Rozložení klastrů v palivové kazetě; A-regulární, B-standardní [5]

(rozložení zachovává trojúhelníkovou mříž). Pro experimenty lze rovněž volit počet použitých regulačních klastrů, minimální počet klastrů v jednom PS jsou 3. Schematické zobrazení rozložení klastrů v PS je na *Obr. 4*.

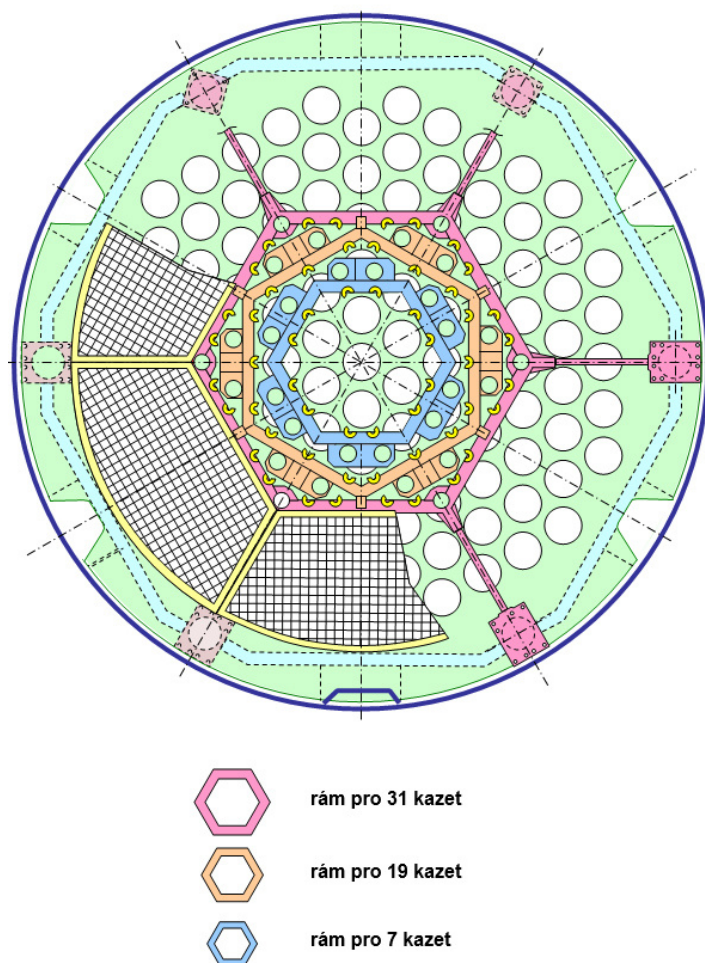
### 1.1.3 Parametry aktivní zóny reaktoru LR-0

Aktivní zóna reaktoru LR-0 je velice variabilní, což tento reaktor předurčuje k širokému použití při nejrůznějších experimentech v oblasti měření hustoty toku neutronů v různých AZ, skladování paliva v kompaktních mřížích, experimenty časoprostorové kinetiky reaktoru či experimenty se stíněním a dozimetrií v jaderné fyzice [3].

Tepelný výkon AZ, a tedy i hustota toku neutronů v AZ, je velice variabilní dle požadavků experimentu. Standardně lze manipulovat v rozmezí tepelného výkonu od 0.1 do 1000 W. Maximální tepelný výkon při kontinuálním provozu je 1 kW tepelný, nebo maximálně 5 kW po dobu nejvýše 5 hodin. Nejvyšší dosažitelná hustota toku neutronů je  $10^{13} \text{n.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  [2].

Reaktor lze provozovat v několika základních konfiguracích dle použité nosné desky, která je umístěna u dna reaktorové nádoby viz *Obr. 5*. Základním rozdělením jsou experimenty s palivem VVER-1000 a s palivem VVER-440. AZ může obecně obsahovat od 6 do 121 palivových souborů VVER-1000. Pro experimenty lze použít symetrické konfigurace AZ s počty palivových souborů: 7, 19, 31, 55, 85, 121 [2]. V praxi se využívá nejčastěji konfigurace se 7, 19 a 31 soubory VVER-1000. Při použití speciálních nosných desek lze však sestavit libovolnou konfiguraci pro měření a experimenty s maketou části AZ reaktoru VVER-1000, čehož se hojně využívá při benchmarkových experimentech [2].

V aktivní zóně se krom paliva a absorpčních klastrů, které zajíždějí do vodících trubek palivového souboru dle požadavků experimentu, nacházejí suché kanály pro měření hustoty toku neutronů. Do aktivní zóny je dle potřeb experimentu možné vkládat další suché kanály pro další detektory, suché makety palivových souborů pro umístění aktivačních detektorů, scintilačních detektorů či dalších experimentálních zařízení či testovaných materiálů.



Obr. 5. Rozložení a umístění nosných desek a konstrukcí pro sestavování libovolné AZ [2]

#### 1.1.4 Řízení a řídicí systém reaktoru LR-0

Reaktor LR-0 byl speciálně navržen tak, aby bylo možné řídit výkon reaktoru pomocí změny hladiny moderátoru nebo pomocí absorpčních klastrů. Lze tedy na řídicím pultu navolit hladinovou regulaci či regulaci klastrů. Další výhodou je možnost měnit koncentraci kyseliny borité v moderátoru, čímž je možné dosáhnout různých hladin moderátoru v daných závážkách AZ. Tyto systémy řízení reaktivity budou probrány později [2].

##### Řízení reaktoru pomocí klastrů

Reaktor LR-0 má k dispozici klastry (každý po 18 absorpčních tyčích) až pro 16 kazet, pokud to daná konfigurace AZ požaduje. Klastry mohou být používány jako buď experimentální, kdy není počet nijak omezen, a nebo jako havarijní - bezpečnostní klastry. Pro libovolnou konfiguraci AZ je podmínkou jejího provozování přítomnost minimálně 6 bezpečnostních klastrů – tedy v LR-0 nelze provozovat menší AZ než je 6 palivových souborů. Poloha havarijních klastrů je při spuštění reaktoru vždy v horní

koncové poloze, polohu experimentálních klastrů lze volit zcela libovolně, ale jejich polohu v průběhu experimentu nelze měnit. Pokud experiment vyžaduje pohyb klastru, lze jeden klustr ze skupiny experimentálních zvolit jako regulační, se kterým je možné během experimentu manipulovat. Takovýto klustr však nesmí mít vyšší váhu než 400 pcm v dané konfiguraci [2].

Absorpční klustr se nejčastěji skládá z 18 absorpčních prutů, které zajíždějí do vodících trub palivového souboru. Absorpčním materiálem je  $B_4C$ , který je umístěn v nerezové trubce  $\varnothing 12.6 \times 0.8$  mm, která chrání daný absorbátor. Každý klustr má svou vlastní pohonnou jednotku s rychlostí pohybu 25 mm/s. Polohu klastru lze nastavit na libovolnou výšku s krokem 2 mm. Zdvih každého klastru je  $(1300 \pm 4)$  mm, takže klustr zůstává ve vodící trubce i při plném vysunutí, což znemožňuje jeho zpříčení při pohybu dolů. Celá pohonná jednotka je elektricky napájena – při ztrátě napětí dojde k automatickému pádu klastrů do AZ, a tedy k zastavení štěpné reakce v reaktoru [2]. Rozložení klastrů v PS je schematicky znázorněno na *Obr. 4*.

### **Řízení reaktoru pomocí hladiny moderátoru**

Reaktor lze řídit pomocí změny hladiny moderátoru v AZ. Pomocí změny výšky hladiny při dané konfiguraci AZ se mění celkový vodo-uranový poměr a dosahuje se tak kritického stavu. V moderátoru může být rozpuštěna kyselina boritá – v koncentracích od 0 do 12 g/l, což ovlivňuje konečnou výšku hladiny moderátoru, při které reaktor dosáhne kritického stavu [2].

Moderátor je do reaktorové nádoby čerpán pomocí dvou hlavních čerpadel skrz napouštěcí hrdla ve dně nádoby reaktoru. Moderátor je skrz soustavu armatur a trub čerpán do reaktoru ze zásobních nádrží, kde se daný moderátor připravuje. Jedno čerpadlo se používá pro rychlejší napouštění moderátoru – tzv. velké čerpadlo, výkon tohoto čerpadla je 10 l/s. Druhé čerpadlo tzv. malé čerpadlo má výkon 1.5 l/s a používá se k jemným změnám reaktivity při provozu reaktoru a při dosahování kritického stavu poblíž kritické hladiny [2]. Každé čerpadlo má své škrťací ventily pro snížení průtoku a uzavírací armatury. V případě nutnosti odstavit reaktor se rozepte napájecí řetězec, který napájí elektro-ventily, které se tak otevrou a moderátor začne rychle vytékat z reaktorové nádoby do zásobníků moderátoru. Úbytek moderátoru má za následek zhoršení vodo-uranového poměru a štěpná řetězová reakce se zastaví. Rovněž jsou do AZ zasouvány všechny skupiny klastrů, takže dojde k odstavení reaktoru velice rychle [2].

Moderátor lze i pro speciální experimenty ohřát na požadovanou teplotu až na 70 °C externím elektrickým topením, protože ohřev od paliva i při maximálním výkonu je zcela nedostatečný pro pozorovatelné změny [2].

### **1.1.5 Řídicí systém LR-0**

Kontrolu a sledování fyzikálních parametrů, tedy stav, ve kterém se reaktor nachází, provádějí systémy ovládacích zařízení reaktoru LR-0. OZ i řídicí systém umožňuje řídit reaktor automaticky nebo ručně. Kontrolu nad reaktorem provádí systém provozního měření výkonu (PMV), systém nezávislé výkonové ochrany (NVO) a provozní hladinoměry [2].

#### **Provozní měření výkonu – PMV**

PMV je tzv. EX-core měření – vněreaktorové měření, které slouží k měření hustoty toku neutronů v aktivní zóně reaktoru, a tedy i k určování výkonu reaktoru. Detektory se nachází těsně vedle AZ, přičemž přesná poloha je dána konfigurací AZ. Slouží jako ochrana před překročením limitní hodnoty výkonu reaktoru a periody reaktoru, kdy při překročení určité limitní hodnoty je vydán povel k potlačení daného jevu (výstražné signály, bezpečnostní odstavení reaktoru). PMV se skládá ze tří identických detekčních tras, které jsou napojeny do bezpečnostního řetězce. Tato detekční trasa se skládá ze štěpné širokopásmové komory RJ-1300, analogové vstupní části (impulsní a proudový zesilovač) a digitálního zpracování signálu tak, aby byl použitelný v detekčním řetězci. Řídicí počítač vyhodnocuje měřený signál z PMV logikou 2 ze 3 – pokud se výsledky dvou nezávislých komor shodují, ŘP vydá patřičný signál na odstavení reaktoru [2].

#### **Nezávislá výkonová ochrana - NVO**

NVO je rovněž tzv. EX-core měření, avšak se nachází v jiné pozici v reaktoru a plní jiné funkce než PMV měření. NVO je soustava tří detektorů pracujících s borovými detektory SNM-12 [2]. Jedná se o diverzní systém kontroly výkonu a rychlosti změny výkonu reaktoru k PMV detektorům. Měření četnosti pulzů je stanovován výkon a rychlost změny výkonu. Při překročení zadaných limitních hodnot na dvou ze tří detektorech, tedy logika 2 ze 3, se vydá signál k odstavení reaktoru [2]. Tento systém neslouží k řízení reaktoru v průběhu jeho provozu, slouží pouze jako bezpečnostní a v případě potřeby, jako jeden z dalších systémů, je schopen vydat signál k rychlému odstavení reaktoru [2].



### 1.1.6 Pomocné systémy a experimentální vybavení reaktoru LR-0

Mezi pomocné systémy reaktoru LR-0 patří komponenty, bez kterých nelze reaktor provozovat, avšak pro tuto práci nemají nikterak závažný význam, a proto nejsou dále podrobněji rozebírány. Tyto komponenty jsou [2]:

- zařízení neutronového zdroje
- osvětlení nádoby reaktoru
- pohonné jednotky klastrů
- vodní hospodářství moderátoru (zásobní nádrže moderátoru a čerpadla)

Dalším experimentálním vybavením celého reaktoru LR-0 je velké množství měřících aparatur s různými typy detektorů, od proporcionálních detektorů, ionizačních komor až po scintilační detektory, kterým je věnována další část této práce.

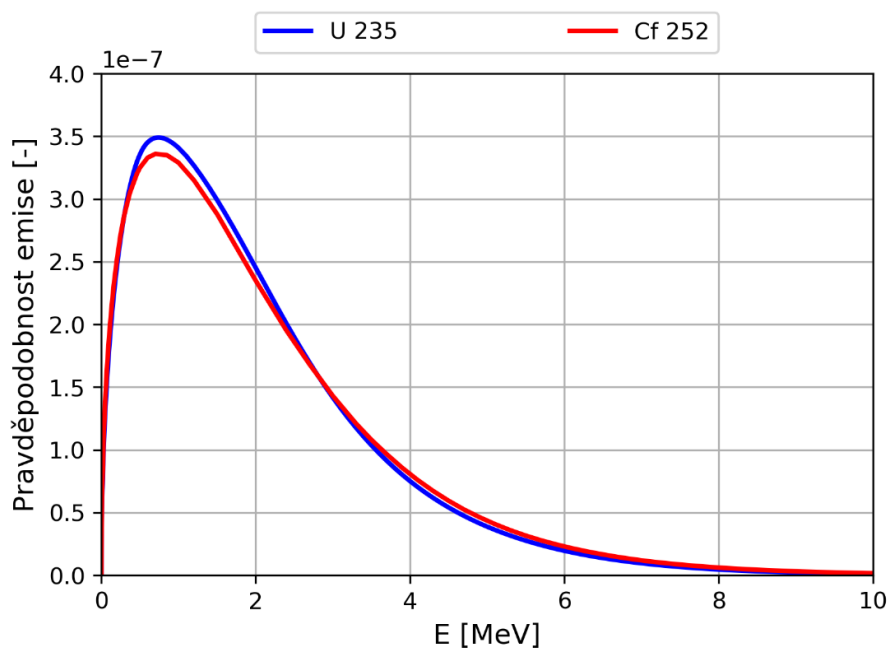
Toto veškeré experimentální zařízení lze využívat při nejrůznějších experimentech. Všechny experimenty prováděné na pracovišti reaktoru LR-0 spadají pod tzv. integrální experimenty. Podstata integrálních experimentů bude vysvětlena níže.

## 1.2 Integrální experimenty

Pro experimenty a měření jaderných dat v zájmu neutronové fyziky se nejčastěji využívá dvou experimentálních přístupů – diferenciálních a integrálních experimentů. Každý typ experimentu má své výhody a nevýhody a jsou specifické pro danou oblast užití. Rozdíl mezi diferenciálními a integrálními veličinami je, že diferenciální veličina je taková veličina, která není závislá na jiné veličině, není tedy přímo ovlivňována jinými procesy, které probíhají v daném prostoru. Integrální veličina je taková, která popisuje celkový účinek všech podveličin v celém rozsahu v daném prostoru.

Diferenciální experiment v neutronové fyzice spočívá v použití monoenergetických zdrojů neutronů např. z urychlovačů či neutronových generátorů ke zkoumání jaderných vlastností zkoumaného materiálu. Míra pravděpodobnosti interakce příslušným kanálem je vyjádřena příslušným účinným průřezem, který lze tímto způsobem měřit.

Integrální veličiny lze obvykle měřit s mnohem menšími nejistotami než diferenciální veličiny. Proto jsou tendence tyto experimenty používat k benchmarkovým experimentům, čímž je možné docílit zvyšování přesnosti diferenciálních jaderných dat. Integrální experiment v neutronové fyzice je zaměřen na stanovení a hodnocení integrálních dat, jako například únikových spekter, reakčních rychlostí,  $k_{\text{eff}}$ , či kinetických parametrů. Díky svému charakteru v něm lze využít neutronů, které nemají monoenergetické spektrum, nýbrž spektrum spojité. Jedná se tedy o spektrum neutronů, které se nachází nejčastěji ve výzkumných jaderných reaktorech či ve speciálně upravených energetických reaktorech – štěpné referenční spektrum. Takové spektrum má spojitý průběh v dané energetické oblasti a závisí pouze na zdroji, ze kterého je toto spektrum emitováno (mezi štěpnými spektry různých izotopů lze pozorovat rozdíly v jejich průběhu). Pro integrální experimenty je možné použít i  $^{252}\text{Cf}$  neutronový štěpný zdroj, neboť jeho spektrum neutronů je rovněž spojité a velice podobné referenčnímu štěpnému spektru  $^{235}\text{U}$ . Z tohoto důvodu se  $^{252}\text{Cf}$  používá jako standart neutronového spektra. Na pracovištích LR-0 a LSNM se integrální experimenty realizují přímo v reaktoru LR-0 či s externím zdrojem neutronů – radioizotopový zdroj  $^{252}\text{Cf}$ . Oba typy experimentů jsou si rovnocenné a závisí jen na konkrétních požadavcích experimentu. Neutronová spektra vznikající štěpením  $^{235}\text{U}$  a  $^{252}\text{Cf}$  mají velice shodný průběh – referenční štěpné spektrum, a proto je možné experimenty mezi sebou porovnávat. Průběh štěpných spekter je znázorněn na Obr. 6.



Obr. 6. Grafické porovnání tvaru štěpných spekter  $^{235}\text{U}$  a  $^{252}\text{Cf}$  v závislosti na energii  $E$  a pravděpodobnosti emise

## 2. Aplikace scintilační spektrometrie v grafitovém prostředí

Scintilační spektrometrie je analytická metoda vhodná pro určení tvaru měřeného spektra daného materiálu, kterou lze použít pro určení tvaru spektra pro všechny typy záření, nejčastěji však pro záření  $\beta$ ,  $\gamma$  a neutronové. Tato metoda využívá interakcí nabitých částic s materiálem - materiál se průchodem nabitě částice excituje a scintilátor při zpětné deexcitaci produkuje elektromagnetické záření – světlo ve viditelném spektru – scintiluje [7]. Scintilace je jednou z nejstarších metod detekce ionizujícího záření přímou interakcí s terčovým materiálem, která se dříve vyhodnocovala pouhým okem a byla tedy velice nepřesná. S aplikací této detekční metody přišel Rutherford, který svým měřením alfa částic, pomocí anorganického scintilátoru ZnS(Ag), dosáhl velmi dobrých výsledků. Změna a zvýšení využití nastala až s vynalezením fotonásobiče, který tuto metodu učinil použitelnou v širším spektru [8]. Proces scintilace je dodnes jeden z nejvíce využívaných procesů sloužící k spektroskopii a spektrometrii ionizujícího záření. Pro spektrometrii dnes existují i jiné typy detektorů s lepším rozlišením a přesností jako např. HPGe, avšak v mnoha ohledech jsou scintilační detektory stále lepší, jelikož nevyžadují žádné chlazení na nízké provozní teploty a nejsou tak citlivé na záření a náročné na elektroniku. Existuje celá řada materiálů, které lze využít jako scintilátor, přičemž by dobrý scintilátor měl splňovat následující kritéria [7]:

- měl by přeměnit kinetickou energii detekované částice na detekovatelné světlo s vysokou účinností
- konverze na světlo by měla být lineární – intenzita světla by měla být úměrná energii detekované částice
- materiál by měl být transparentní pro vlnové délky světla, které vznikají při interakci
- doba svitu při luminiscenci by měla být co nejkratší, aby bylo možné produkovat rychlé světelné pulzní signály
- materiál by měl mít vysokou optickou kvalitu v celém svém objemu, který se využije pro konstrukci detektoru

- index lomu světla v materiálu by měl být blízký indexu lomu světla ve skle (1.5) tak, aby byl možný efektivní přestup světla ze scintilátoru do fotonásobiče

Ne každý materiál splňuje dokonale všechny předchozí kritéria, a tak je tedy volba scintilátoru vždy kompromisem v závislosti na jeho použití. Jejich extrémní výhodou je, že je lze konstruovat v libovolném objemu detektoru či geometrii detekčního objemu. V praxi se využívají scintilátory anorganické a organické [7].

## 2.1 Anorganické scintilátory

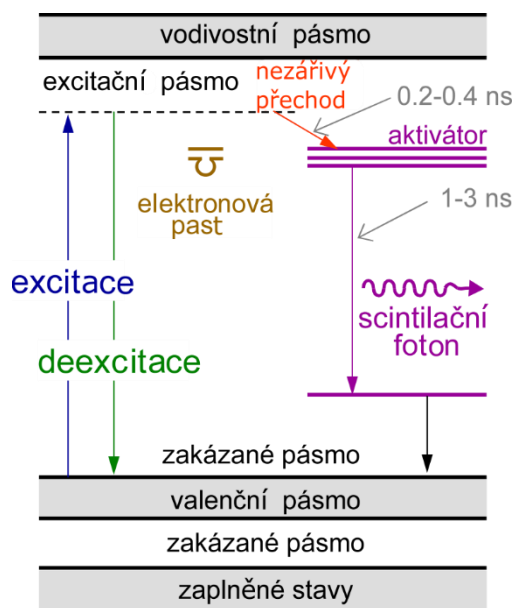
Obecně lze říci, že anorganické scintilační materiály mají lepší citlivost, linearitu a vyšší svítivost při interakci s detekovanými částicemi, avšak jejich odezva je dosti pomalá – dlouhá doba dosvitu. Anorganické scintilátory se nejčastěji využívají k spektrometrii gama záření, díky jejich vyšší hustotě a vyššímu nukleonovému číslu použitých materiálů [8]. Pro neutronovou spektrometrii nejsou až na výjimky vhodné, neboť je u nich problematické oddělení neutronové a fotonové složky a zároveň se v neutronovém poli silně aktivují a jejich vlastní aktivita znehodnotí měřicí aparaturu (například u  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  je aktivace problém s ohledem na velký účinný průřez  $^{139}\text{La}$  na záchyt neutronu).

### 2.1.1 Princip funkce anorganického scintilátoru

Produkce fotonů, které lze využít k detekci, v anorganických scintilátorech je vysoce závislá na krystalické struktuře daného materiálu. V čisté krystalové struktuře se mohou elektrony vyskytovat pouze v určitých energetických pásech, ve kterých je produkce scintilačních fotonů velice omezená a neefektivní. Při průchodu ionizujícího záření dochází k excitaci valenčních elektronů scintilátoru do vodivostního pásu. Vodivostní pás a valenční pás je oddělen zakázaným pásmem, kde se elektron nemůže nacházet. Šířka tohoto pásma je v rozmezí od 3 do 10 eV [7]. Excitovaný elektron tak může rekombinovat s dírou ve valenčním páse nebo vytvořit vázaný stav s dírou zvaný exciton. Excitony mohou v krystalu rekombinovat a vyzářit foton [8]. Tato pravděpodobnost je vysoce závislá na teplotě krystalu a v teplotách pohybujících se kolem 290 K je velice nízká.

K vylepšení bilance vznikajících fotonů při pokojových teplotách v čisté krystalické struktuře se krystaly dopují přídatnými materiály-aktivátory. Tyto příměsi mají energetické hladiny mezi valenčními a vodivostními pásy scintilátoru. Nyní tedy nejen

excitony ale i elektrony ve vodivostním pásmu mohou přejít na energetickou hladinu příměsi, ze které při deexcitaci může vzniknout foton [8]. Princip vzniku scintilačního fotonu při přechodu přes aktivátor je znázorněn na *Obr. 7*.



*Obr. 7. Princip vzniku scintilačního fotonu v anorganickém materiálu dopovaný aktivátorem. Překresleno z [9]*

Ve spektrometrii gama záření patří mezi nejčastěji používané anorganické scintilátory NaI(Tl), CsI(Tl), CsI(Na), BGO ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ), ZnS(Ag) a další viz [7]. Pro měření tepelných neutronů lze použít anorganického scintilátoru Li(Eu), ve kterých se využívá obohaceného lithia  $^6\text{Li}$  a tedy i interakce  $^6\text{Li}(n,\alpha)$  [7].

Při experimentech v grafitovém prostředí s vloženou zónou v LR-0 a s grafitovou krychlí v LSNM bylo využíváno výhradně Stilbenového scintilačního detektoru (organický scintilátor), a proto se již anorganickými scintilátory dále nebudeme zabývat.

## 2.2 Organické scintilátory

Organické scintilační detektory mají různou podobu skupenství. Můžeme se setkat s krystalickou, polymerní či kapalnou strukturou detektoru. Výhodou organických scintilátorů je, že jejich čas dosvitu je velice krátký, avšak jejich světelný výtěžek, tedy počet vytvořených fotonů na 1 MeV deponované energie, je nižší než u anorganických scintilátorů. Nejlepší organický scintilátor – antracen, dosahuje jen zhruba třetinového výtěžku fotonů v porovnání s NaI(Tl) [8]. Organické scintilátory se nejčastěji používají k spektrometrii alfa, beta, gama záření a k spektrometrii neutronů, díky vysokému obsahu

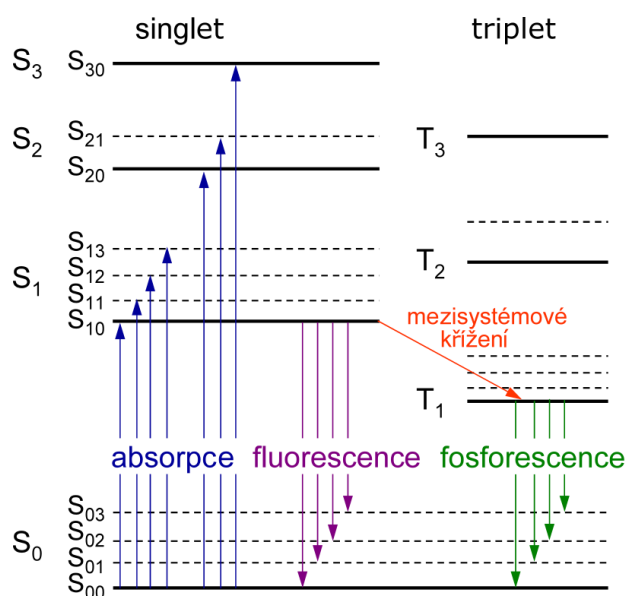
vodíku v molekulách. Díky vysokému obsahu vodíku dochází k rozptylu, rozptýlené protony dále způsobují scintilaci materiálu [7].

### 2.2.1 Princip funkce scintilátoru

Produkce světla v organickém scintilátoru je mírně odlišná od produkce v anorganickém scintilátoru, což je způsobeno převážně tvarem a vlastnostmi molekuly scintilačního materiálu. Organický materiál lze použít jako scintilátor, pokud se u něj vyskytuje  $\pi$  – elektronová struktura. Tato vazba se vyskytuje u aromatických uhlovodíků s centrální symetrií jádra. Při průchodu ionizujícího záření skrz scintilátor dochází k excitaci elektronů ze základního stavu  $S_0$  do stavů  $S_1, S_2, S_3, \dots$  nebo do vibračních stavů  $S_{00}, S_{01}, S_{02}, S_{11}, \dots$  do kterých jsou jednotlivé hladiny dále děleny. K excitaci do první hladiny je zapotřebí zhruba 3 až 4 eV [7]. K přechodu mezi dalšími vyššími hladinami je zapotřebí o něco méně energie, než je tomu mezi základním a  $S_1$  stavem.

Je-li elektron excitován do vyšších stavů, než je  $S_1$ , přechází vnitřními procesy na stav  $S_1$  za vzniku tepla. Z této hladiny pak dochází vždy k deexcitaci na nižší hladinu vyzářením scintilačního fotonu. Deexcitace může probíhat do všech nižších vibračních stavů základní hladiny. Takovému přechodu se říká fluorescence [7].

Ze singletního stavu může elektron přejít do tripletního stavu, kde dochází k deexcitaci podobně. Tento přechod deexcitace se nazývá fosforescence [7]. Délka světelného záblesku je zhruba  $10^{-8}$  až  $10^{-9}$  s. Tripletový přechod, fosforescence, se oproti



Obr. 8. Mechanismus vzniku scintilačních fotonů v organickém scintilátoru formou fluorescence a fosforescence. Překresleno z [9]

fluorescenci vyznačuje delší dobou života (více než  $10^{-4}$  s) a nižší energií mezi základním a prvním excitovaným stavem. Světlo vzniklé fosforescencí má vyšší vlnovou délku [7]. Takto vzniklé světlo má příliš krátkou vlnovou délku, aby jej bylo možné efektivně detekovat (detektory mívají nejvyšší citlivost na světlo v oblasti fluorescenčního maxima). Proto se do původního scintilátoru přidávají fluorescenční činidla. Ty fungují jako posunovače vlnové délky světla vzniklého fosforescencí [8]. Princip vzniku scintilačních fotonů fluorescencí a fosforescencí je znázorněn na *Obr. 8*.

Při neutronové spektrometrii se nedetekuje přímo interakce neutronu s materiálem, nýbrž procházející neutron scintilačním materiálem vyrazí z vodíku proton. Proton je nabitá částice, která může způsobit ionizaci materiálu a lze jej tedy detekovat [7].

Mezi nejčastěji používané organické krystalické scintilátory patří antracen, který je i neefektivnějším organickým scintilátorem, a stilben. Plastické organické scintilátory jsou například EJ-200, EJ-204 a EJ-208 (modifikace poly-vinyl-toluenu). Kapalné scintilátory EJ-309 či NE-213 [7].

### 2.3 Scintilační materiál Stilben

Jak již bylo zmíněno, stilben je krystalický organický materiál, který se využívá pro spektrometrii neutronů a byl použit při všech spektrometrických experimentech s grafitovými geometriemi, které jsou předmětem této práce, v laboratořích reaktoru LR-0 a LSNM.

Stilben ( $C_{14}H_{12}$ ) je aromatický uhlovodík se dvěma možnými alotropními modifikacemi, označované jako cis-stilben a trans-stilben. Pro spektrometrii rychlých neutronů je nutné využít symetrické alotropní modifikace, trans-stilben (někdy také E-stilben) neboli 1,2-difenylethylen. Hustota toku neutronů a jeho spektrum je měřeno na bázi metody rozptýlených protonů, což je interakce neutronu s vodíkem, který je vázán ve struktuře stilbenu. Nejčastěji se používá pro spektrometrii neutronů od energií od 0.5 do 20 MeV pro jeho velice dobrou tvarově-pulzní diskriminaci od gama záření [10]. Účinnost světelného výstupu scintilačních fotonů je celkem nízká, výtěžek je asi jen 30 % oproti NaI(Tl). Světelný výstup lze však snadněji rozlišit, tedy kterým typem částice byl produkován, je ho tak tedy možné použít i ve směsném poli neutronů a gama záření [7]. Další vlastnosti stilbenu jsou vypsány v *Tab. 2*.

Tab.2 Hlavní vlastnosti krystalu stilbenu [13]

Světelný výtěžek (% , ku Antracenu)	50
Hustota ( $\text{g/cm}^3$ )	1.16
Doba dosvitu (ns)	4.5
Vlnová délka scintilačního světla v peaku (nm)	410
Počet atomů H / počet atomů C	0.858

Stilbenový krystal a celá detekční sonda s fotonásobičem a další vnitřní elektronikou jsou zobrazeny na *Obr. 9*.

Při experimentech s grafitem v různých geometriích, které jsou předmětem této práce, bylo pro měření hustoty toku neutronů a spektra těchto neutronů použito scintilačního stilbenového detektoru. Reálný detektor, který byl použit pro tato měření je znázorněn na *Obr. 9*.



*Obr. 9. Detekční sonda se stilbenovým krystalem používaná pro měření spekter neutronů na pracovištích LR-0 a LSM*

Detailní popis uložení, délka měření a nastavení celého detekčního řetězce bude detailněji probráno v části 4 této práce.



### 2.3.1 Popis detekční aparatury

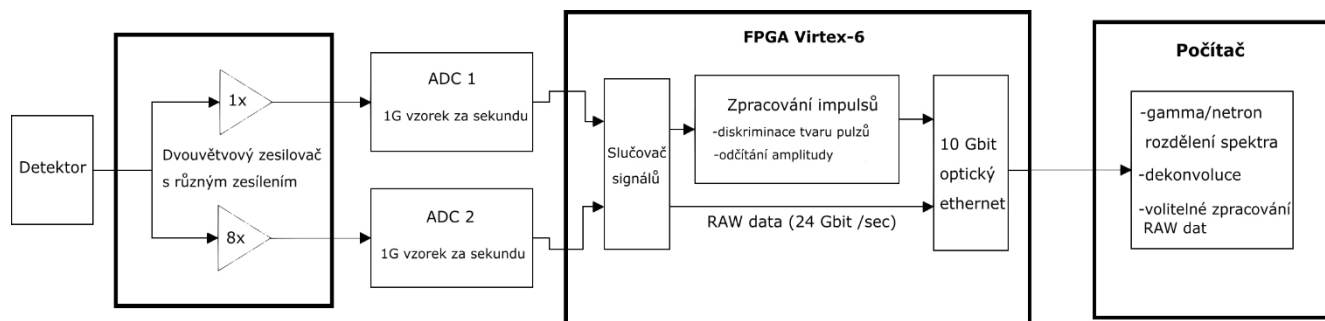
Detekční aparatura se skládá z několika komponent, jejichž volba, dle parametrů dané komponenty, je klíčová pro správnou funkci celého detektoru a má nemalý vliv na možnosti a přesnost měření. Celý detekční řetězec se skládá z následujících komponent [7]:

- Detektor – specifický scintilační materiál dané geometrie a vlastností
- Fotonásobič – slouží k přeměně světla na elektrický proud a tento slabý signál zesílí
- Předzesilovač a zesilovač – slouží k zesílení signálu z fotonásobiče, nachází se zpravidla ihned u fotonásobiče, aby byl potlačen efekt rušení
- Analyzátor – může být analogový či digitální
- Výstup – jedná se většinou o software na PC, který zpracovává výstupní data

Z těchto jednotlivých komponent se obecně nejčastěji skládá celé detekční zařízení, lze se setkat i s jinými strukturami zapojení, avšak základní komponenty zůstávají zachovány. V našem případě bylo využito modernějšího zapojení s použitím vysokofrekvenčních digitálních obvodů. Při použití analogových analyzátorů je potřeba použít fotonásobiče s vyšším zatížením anody, a proto je čas potřebný na zpracování impulzů dosti dlouhý. Zmíněná délka pulzu je výhodná z hlediska malých nároků na vyhodnocovací aparatury. Převládající nevýhodou je fakt, že takový detekční řetězec je schopen zpracovávat okolo 1000 pulzů za sekundu [10]. Analogový spektrometr zpracovává odděleně amplitudu měřeného pulzu a amplitudu tvarově-pulzní diskriminace. Digitalizace nastává až na konci zpracovávaného signálu v softwaru v PC [10].

V laboratořích LR-0 a LSM se v současné době používá obou spektrometrických řetězců – analogového i digitálního. Digitální spektrometrický řetězec má určité výhody oproti analogovému, tyto výhody budou dále rozebrány. Digitální spektrometrický řetězec obsahuje menší množství aktivních prvků, čímž je potlačen vliv šumů vznikajících mezi jednotlivými komponentami. Digitální spektrometr umožňuje rovněž zpracovat vyšší množství detekovaných pulzů – zatížení anody je mnohonásobně nižší, a tedy jeho rychlost zpracování a vyhodnocení impulzů zabere kratší čas, čímž klesá i mrtvá doba detektoru.

Při měření neutronových spekter byl využit stilbenový detektor s průměrem krystalu 10 mm, výškou krystalu 10 mm a digitální vyhodnocovací systém firmy VF typ FD-11. Schématické uspořádání celého detekčního řetězce FD-11 s detektorem, který byl použit pro měření spekter neutronů, je na *Obr. 10*.

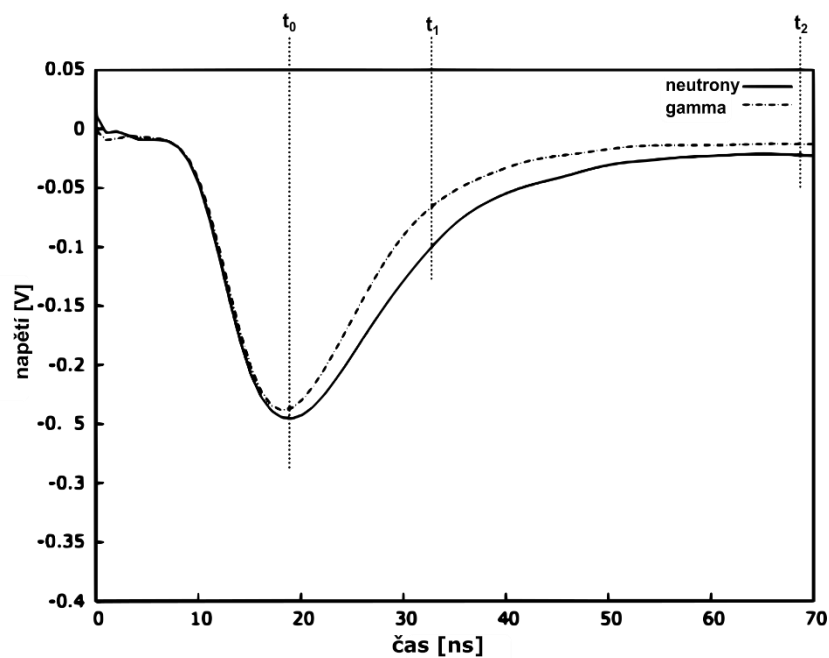


*Obr. 10. Schéma dvouparametrického digitálního detekčního řetězce s detektorem a analyzátozem FD-11. Překresleno z [10]*

Digitální spektrometr FD-11 je vybaven dvojitým odděleným zesilovačem, na který navazují analogově digitální převodníky. Rozdělení má takové výhody, že vzroste síla signálu oproti šumu. Analogově digitální převodník má vzorkovací frekvenci 1 GHz, což umožňuje zpracovat až 400 000 impulsů za sekundu bez vlivu mrtvé doby či snížení rozlišovací schopnosti detektoru [10]. Možnost zpracovávat takto vysoké četnosti impulsů tento detekční řetězec předurčuje k měření hustoty toku neutronů i uvnitř AZ reaktoru LR-0, což dříve s analogovou aparaturou nebylo možné.

Dále je signál v zařízení zpracováván, pomocí digitálního zpracování měřených impulsů. V této části dochází ke zpracování a vyhodnocování tvarů pulzů, jejich amplitud a časového průběhu. Veškerý výstup z multikanálového analyzátoru je posílán do PC, který celý detekční řetězec řídí. Do PC přichází jak zpracovaná data, tak data v surové podobě – jejich zpracování probíhá až v PC ve speciálním softwaru, kde je možné si libovolně nastavit tvarově pulzní diskriminaci měřených spekter zpracovávaných v digitálním spektrometru, konstanty  $t_1$ ,  $t_2$  a  $t_0$ . Digitální spektrometr používá integrální metodu pulzní tvarové diskriminace (D), která je založená na srovnávání ploch integrálů. Metoda spočívá v porovnání omezených oblastí zadní hrany měřené odezvy  $Q_1$  s plochou omezenou celou odezvou  $Q_2$ . Oblasti  $Q_1$  a  $Q_2$  jako integrály v mezích času jsou vyjádřeny vztahem (1) [10].

$$Q_1 = \int_{t_1}^{t_2} i(t)dt \quad Q_2 = \int_{t_0}^{t_2} i(t)dt \quad D = \frac{Q_1}{Q_2} \quad (1)$$



Obr. 11. Schématické znázornění průběhu detekovaného signálu s naznačenými vstupními parametry diskriminace signálu. Překresleno z [10]

Implementovaná integrační metoda má lineární výpočetní složitost, a proto je vhodná pro online měření s vysokými počty zpracovávaných impulzů za sekundu. Druhým parametrem spektrometrického systému je energie detekované částice. Energie se vyhodnocuje z plochy integrálu celé měřené odezvy. V reálu se měří rozptýlená protonová spektra a elektronová spektra. Při vyhodnocování neutronového spektra se provádí dekonvoluce měřeného rozptýleného protonového spektra. Fotonová spektra jsou získávána dekonvolucí elektronových spekter [10]. Grafické znázornění průběhů obou měřených spekter s danými integračními konstantami a prahy jsou znázorněné v Obr. 11.

### **3. Namodelování studovaných geometrií ve vhodném výpočetním kódu**

V dnešní době nacházejí výpočetní kódy své uplatnění téměř v každé oblasti, v reaktorové a neutronové fyzice tomu není jinak. Tyto kódy nachází nejširší využití ať už pro simulace provozních stavů reaktorů, k modelování vyhořívání paliva v jaderném reaktoru a k tvorbě kartogramu závažek čerstvého paliva, k modelování průběhů hustoty toku neutronů určité energie v různých materiálech a geometriích, tak k modelování průběhu havarijních stavů s tavením jaderného paliva a k mnoha dalším čistě vědeckým účelům. Výpočetní kódy v dnešní době usnadňují práci a eliminují potřebu dané problémy experimentálně měřit, a tím poskytují možnost prozkoumat širší pole reaktorové a neutronové fyziky. Tyto výpočetní kódy je však složitými způsoby potřebné validovat, aby jejich výpočet odpovídal experimentálnímu měření. S výpočetními kódy, kterých bylo využito pro napsání této práce, se nyní seznámíme podrobněji.

#### **3.1 Výpočetní kódy v neutronové fyzice**

Výpočetní kód je počítačový software, který na základě dříve změřených experimentálních jaderných dat a na základě různých výpočetních a matematických algoritmů dokáže simulovat různé charakteristiky, vlastnosti a děje, které probíhají v jaderném reaktoru či v experimentální sestavě. Pro každý výpočetní kód, který řeší interakce neutronů s materiálem a jejich chování je nutná definice neutronového pole. Dle metodiky výpočtu dělíme výpočetní kódy na deterministické a stochastické (pravděpodobnostní).

##### **3.1.1 Stochastické výpočetní kódy a Monte Carlo kódy**

Pravděpodobnostní výpočetní kódy využívají nejčastěji metodu Monte Carlo. Metoda Monte Carlo je matematická metoda, která má své počátky již v 18. století, kdy se francouzský matematik George Louis Leclerc de Buffon snažil experimentálním měřením určit hodnotu čísla  $\pi$  pomocí hodů sirek na definovanou podložku rozdělenou ekvidistančními pruhy. V jaderném odvětví se metoda Monte Carlo začala vyvíjet ve 40. letech 20. století v USA v Národní laboratoři Los Alamos vědeckými pracovníky Stanislavem Ulamem a Johnem Neumannem. Tato metoda byla poprvé použita pro simulaci počtu prošlých neutronů skrz vodní nádrž a zakládá se na matematické pravděpodobnosti a statistice [11][12].

Vlastní výpočetní metoda Monte Carlo je numerická metoda založená na mnohokrát opakovaném výpočtu s náhodnými čísly, snažíme se tedy určit střední hodnotu daného zkoumaného náhodného jevu. Přesnost metody je tedy pouze závislá na počtu provedených pokusů a parametrech generátoru náhodných čísel. Čím více „náhodně“ generátor náhodná čísla volí, tím se dosahuje přesnější střední hodnoty zkoumaného jevu.

Tímto způsobem lze např. pohyb neutronů v daném prostředí aproximovat jako jev, kdy neutron prochází materiálem a dle určité pravděpodobnosti různě interaguje. Jelikož i průchod neutronů a jeho interakce jsou pravděpodobnostní jevy, metoda Monte Carlo poskytuje velice dobré výsledky. Neutron může být v materiálu pohlcen nebo rozptýlen. Pokud je neutron pohlcen, jeho generace je ukončena a tento neutron se ve výpočtech dále neuvažuje, avšak počet pohlcených neutronů je zaznamenáván. Pokud je neutron rozptýlen, určí se opět pomocí generátoru náhodných čísel jeho směr, rychlost a místo další srážky. Takto lze při dostatečném počtu pokusů zmapovat trajektorie neutronů, které prochází materiálem [14].

### **Výpočetní kód Serpent**

Kód Serpent byl vyvinut v Centru technického výzkumu VTT ve Finsku v roce 2004 pod vedením Jaakko Leppänen. Jedná se o kód pracující na bázi Monte Carlo metody, který je neustále vyvíjen a zdokonalován jak v přesnosti, tak i v možnostech jeho využití. Nachází široké uplatnění při výpočtech v reaktorové fyzice při navrhování palivových cyklů, kritičnosti aktivních zón či pro výpočty hustoty toku neutronů v definovaných geometriích. V dnešní době existuje již druhá verze - Serpent 2, která má více možností výpočtů, než měla předchozí. Mezi rozšíření patří například multi-fyzikální simulace, transport neutronů a fotonů v reaktoru a výpočty dávky v daném místě pro použití stínění, v neposlední řadě pro výzkum jaderné fúze [14]. Celý kód byl napsán ve standardním ANSI-C jazyce, je primárně určen pro operační systém Linux, ale může být kompilován i na MAC OS X nebo UNIX [15].

### **Výpočetní kód MCNP**

Kód MCNP (Monte Carlo N-Particle Transport Code) byl vyvinut v Národní laboratoři Los Alamos (LANL) ve Spojených státech Amerických v roce 1957. V průběhu let byl vylepšován a zdokonalován, nyní je nejaktuálnější verzí MCNP 6.1. [16]. MCNP je multifunkční výpočetní kód silně využíván v reaktorové fyzice pro výpočty transportů neutronů, fotonů či elektronů v materiálu, lze jej použít pro

výpočet kritičnosti aktivních zón, pro výpočty hustoty toku neutronů v prostoru, pro bezpečnostní analýzy skladovacích prostor ať už čerstvého či vyhořelého paliva a mnoho dalších. Své uplatnění nachází i v nukleární medicíně pro výpočty dávek pacientů při ozařování nebo i v jaderné fúzi. Celé MCNP bylo původně napsáno v programovacím jazyce FORTRAN 90, vývoj programu pokračoval v původním jazyce [16].

## 3.2 Modelované geometrie

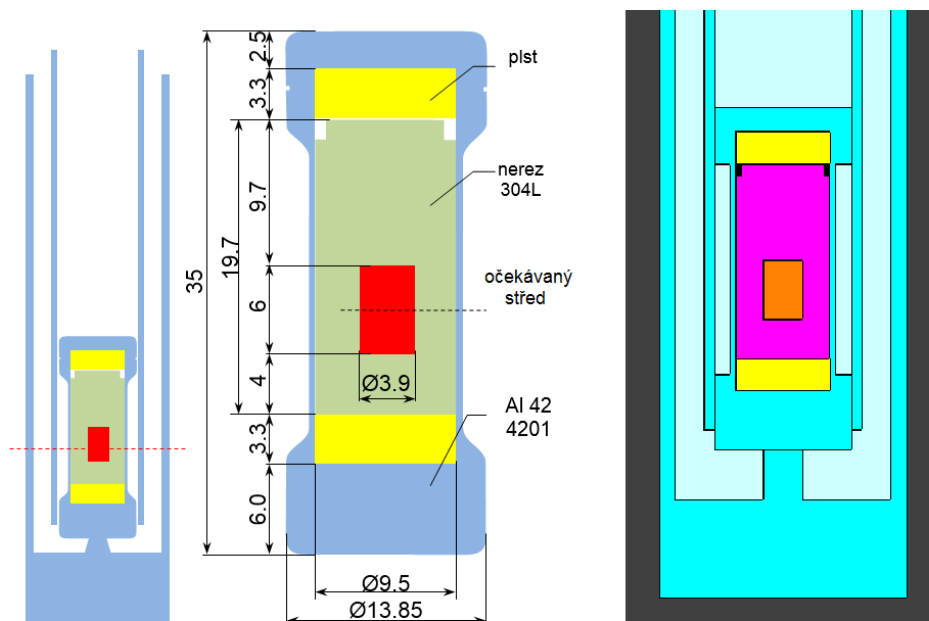
Tato část práce se věnuje popisu sestavování modelů v daných výpočetních kódech, které byly poté experimentálně sestaveny a bylo na nich provedeno experimentální měření. Byly sestaveny a namodelovány dvě hlavní geometrie, grafitová kostka a vložná grafitová zóna do reaktoru LR-0.

### 3.2.1 Modelování grafitové krychle

Model grafitové krychle byl prvotně sestavován v kódu Serpent 2.30., poté byla daná geometrie domodelovaná i v programu MCNP 6. Sestavení modelu v obou výpočetních kódech a jejich následné porovnání bylo voleno z důvodu validace mikroskopických účinných průřezů, které s problematikou této práce úzce souvisí [17].

#### Sestavení modelu v kódu Serpent 2.30.

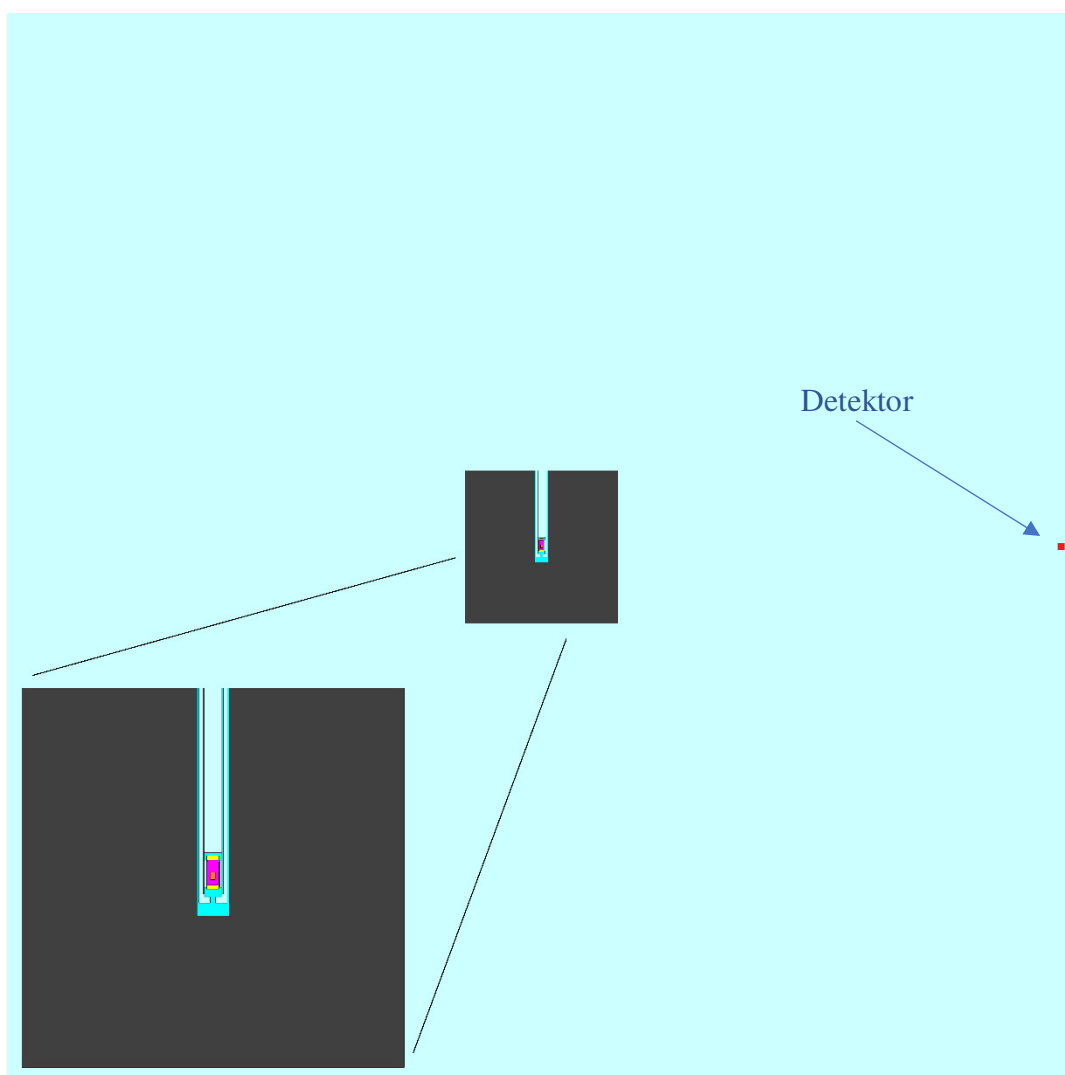
Model byl sestavován dle skutečné geometrie pomocí příkazů, které byly nalezeny v manuálu k programu Serpent [15] a dle online dostupného manuálu Serpent-wiki [18]. Celý model je složen z jednoduchých obrazců a prostorových geometrií, které dohromady tvoří kopii provedeného experimentu. Nejprve byl namodelován zdroj neutronů. Jako zdroj neutronů bylo použito  $^{252}\text{Cf}$ . Zdroj byl modelován v reálných rozměrech dle technického výkresu, byly brány vždy střední hodnoty daných rozměrů z výkresu, pokud se zde vyskytoval rozměr s danou tolerancí z výroby. Pouze některé rozměry jako zkosení a zaoblení hran byly aproximovány a zjednodušeny. Porovnání skutečného výkresu a modelu neutronového zdroje je na *Obr. 12*. Poté byla přimodelována potrubní pošta, která slouží k transportu neutronového zdroje ze stínícího kontejneru na místo určení. V případě potrubní pošty bylo rovněž provedeno jedno zjednodušení – namísto kuželovitého podstavce, na který dosedá neutronový zdroj, byl tento podstavec namodelován jako malý váleček. Veškeré provedené zjednodušení ve zdroji a v potrubní poště však do modelu vnáší zanedbatelnou chybu, která je hluboko pod statistickou chybou celého výpočtu.



Obr. 12. Nákres reálného zdroje s rozměry a s potrubní poštou (vlevo), namodelovaný komplet zdroj v Serpentu (vpravo)

Neutronový zdroj a potrubní pošta byly namodelovány jako jeden objekt formou pinu – proutku. Jednotlivé konstrukční materiály zdroje i potrubní pošty byly namodelovány dle izotopického složení materiálu, pro některé části, jejichž složení je těžko dohledatelné (např. plst' v neutronovém zdroji sloužící k eliminaci pohybu a nárazů primárního pouzdra neutronového zdroje v transportním pouzdru), bylo použito složení převzaté z kompendia materiálů sloužící pro modelování v neutronové fyzice pro modely k transportu neutronů [19]. Tento pin obsahující neutronový zdroj a potrubní poštu byl poté v modelu vložen do středu krychle tak, aby střed neutronového zdroje zasahoval přesně do středu krychle. Tato první modelovaná krychle modeluje grafitovou krychli, jejíž hrana je 30 cm. Krychle byla poté vyplněna čistým uhlíkem  $^{12}\text{C}$  s hustotou  $\rho = 1.579 \text{ g/cm}^3$ . Celá grafitová krychle s neutronovým zdroje uprostřed byla umístěna v další krychli, která má svůj střed opět ve středu zdroje. Vnější krychle symbolizuje laboratoř LSM, ve které bylo měření prováděno. Tato vnější krychle má délku hrany 210 cm a byla vyplněna reálným vzduchem, jehož složení bylo převzato z [19]. Ve vzdálenosti 100 cm od středu neutronového zdroje byl v krychli vyplněné vzduchem umístěn detektor. Detektor byl namodelován jako objemový detektor tvaru krychle s hranou 2 cm. Tvar detektoru byl místo válcového tvaru aproximován malou krychlí, tato aproximace má jen malý vliv na celkovou přesnost výpočtu, výstup měřeného spektra byl nanormován na reálný objem detektoru. Detektor zaznamenával zachycené neutrony v intervalu od 1 do 10 MeV s krokem 100 keV. Velikost krychle, která symbolizuje

laboratoř LSNM je menší než reálná laboratoř. Toto zjednodušení bylo zvoleno z důvodu menšího objemu celé výpočetní geometrie, a tedy i zpřesnění a zrychlení výpočtu. Hranice krychle, simulující LSNM, tvořila hraniční podmínka vakua – neutron který ve výpočtu projde touto hranicí zanikne a dále se ve výpočtu neuvažuje. Použití hraniční podmínky vakua a zmenšení celé geometrie je možné na základě pozdějšího experimentálního měření, při kterém byl tento efekt respektován. Na *Obr. 13* je vidět model celé geometrie s grafitovou krychlí a zdrojem v modelové laboratoři LSNM, červená tečka symbolizuje pozici umístění detektoru.

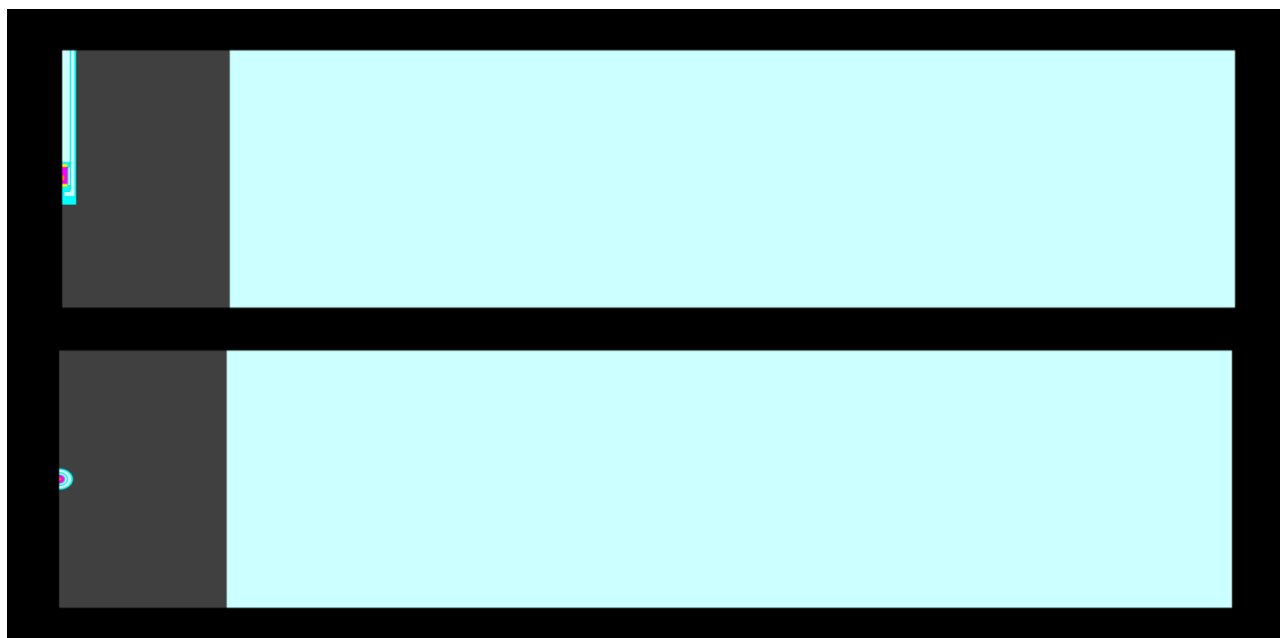


*Obr. 13. Namodelovaná laboratoř LSNM s měřenou grafitovou kostkou s umístěním detektoru a detailem vnitřku grafitové kostky*

Tento výpočet byl po dlouhém sestavování spuštěn s vysokými vstupními parametry v kódu Serpent, kde bylo simulováno celkem 20 000 generací neutronů při počtu 1 000 000 neutronů na každou generaci. Celkový počet neutronů, se kterými kód počítal, byla tedy 20 000 000 000. Tyto neutrony vznikaly v neutronovém zdroji  $^{252}\text{Cf}$ , konkrétně



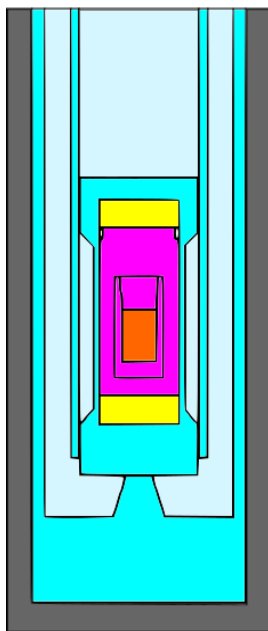
v materiálu, který je na *Obr. 12.* naznačen oranžovou barvou. Energie neutronů vznikajících ve zdrojovém materiálu  $^{252}\text{Cf}$  byla definována pomocí příkazu, který respektuje veškeré štěpení daného zdrojového izotopu, tedy (f,n), (f,2n), (f,3n) reakce, a i pravděpodobnost energie, se kterou daný neutron při štěpení vznikne. Bylo využito příkazu MT18 pro materiál  $^{252}\text{Cf}$  [18]. I přes velmi vysoké množství simulovaných neutronů výpočet nedosahoval požadované přesnosti a byl dosti zdlouhavý, výpočet zabral cca 10 dní (výpočet byl prováděn na výpočetních serverech CV Řež na 20 jádrech paralelně). Z tohoto důvodu byla upravena celá modelovaná geometrie. Zdroj společně s potrubní poštou a grafitovou krychlí zůstaly nezměněny, avšak modelovaná LSNM byla zásadně zmenšena. Krychle simulující LSNM byla zmenšena na kvádr, který respektoval rozměry grafitové krychle a vzdálenost detektoru od středu neutronového zdroje. Krychle z grafitu s neutronovým zdrojem byla posunuta tak, že střed neutronového zdroje začínal v nulové souřadnici kvádru – v modelované geometrii se nacházela pouze  $\frac{1}{2}$  modelované grafitové krychle se zdrojem. Tímto zmenšením se modelovaná geometrie zmenšila o téměř 99 %, tím se docílilo požadované přesnosti výpočtu a zároveň klesla i časová náročnost. Zmenšená geometrie je na *Obr. 14.* Jeden ze vstupních souborů v kódu Serpent, který byl použit v této práci, lze nalézt v příloze A.



*Obr. 14. Bokorys (nahore) a půdorys (dole) modifikované modelované geometrie*

### Sestavení modelu v kódu MCNP 6.1

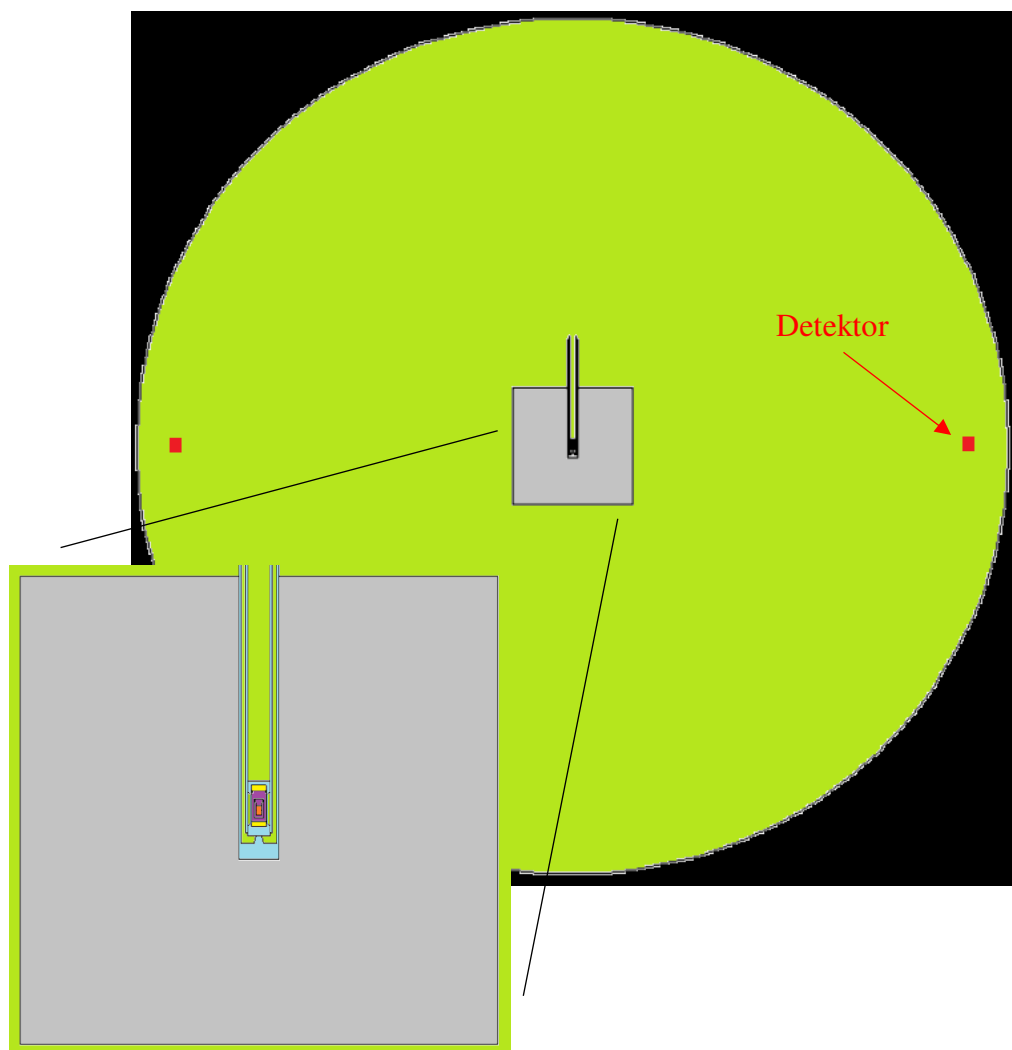
Sestavení modelu grafitové krychle v kódu MCNP 6.1 probíhalo za asistence konzultanta této práce a zároveň veškeré výpočty v tomto kódu byly provedeny prostřednictvím konzultanta. Model byl sestavován pomocí příkazů z manuálu kódu. Celá geometrie byla složena z jednoduchých obrazců, které na sebe navazovaly a velice věrně popisují celou reálnou geometrii pokusu. Neutronový zdroj byl sestavován stejným postupem jako tomu bylo v předchozí části. Bylo použité stejné složení materiálů (ocelové pouzdro, hliníkové koncovky potrubní pošty, plstěná zarážka v neutronovém zdroji a složení neutronového zdroje). Rozměry modelu byly rovněž voleny jako střední rozměry daného objektu. Celý neutronový zdroj v transportním pouzdru byl namodelován bez zjednodušení, zkosení hran i kuželík, na který dosedá neutronový zdroj, byl namodelován věrně. Zdrojem neutronů byla opět pouze část tvořená Cf, neutrony vznikaly ve spektru, které bylo definované Mannhartovým spektrem [20]. Právě toto je dosud jediné referenční neutronové spektrum. V tomto výpočtu bylo simulováno celkem  $10^{11}$  neutronů. Model zdroje v MCNP uloženého v potrubní poště je zobrazen na *Obr. 15*.



*Obr. 15. Nákres modelu neutronového zdroje s potrubní poštou v kódu MCNP*

Neutronový zdroj byl společně s potrubní poštou vložen do namodelované krychle se stejnými rozměry jako v modelu v kódu Serpent – hrana krychle má délku 30 cm. Tato krychle byla vyplněna grafitem o hustotě  $1.72 \text{ g/cm}^3$ . Model laboratoře LSNM byl zvolen jako koule, která má střed ve středu neutronového zdroje. Tvar koule byl zvolen z důvodu předejití zaměnění geometrií ve vstupním kódu s geometrií grafitové krychle. Celá

namodelovaná geometrie má poloměr  $r = 105$  cm. Hraniční podmínky koule byly voleny stejně jako v předchozím případě – vakuum (každý neutron prošlý tímto povrchem je zničen a dále se s ním neuvažuje). Grafické znázornění namodelované geometrie je na *Obr. 16*.



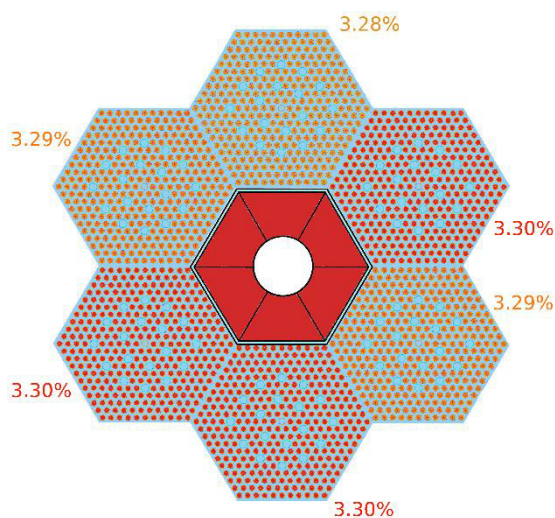
*Obr. 16. Model laboratoře LSNM s měřenou grafitovou kostkou s umístěním detektoru a detailem vnitřku grafitové kostky*

Na *Obr. 16* jsou červenou barvou znázorněny dva detektory. Jelikož se jedná o symetrickou geometrii, byly v modelu použité celkem 4 krychlové identické detektory rozmístěné vždy kolmo proti jedné ze čtyř stěn krychle ve vzduchu (zelená barva). Tato modifikace byla použita kvůli zpřesnění výpočtu. Výsledné naměřené spektrum, které bylo následně používáno a analyzováno, bylo přepočteno a nanormováno pouze na jeden reálný detektor.

### 3.2.2 Vložná grafitová zóna v reaktoru LR-0

Tento model byl sestaven pouze ve výpočetním programu MCNP 6.1 a to z důvodu již existujícího modelu v tomto kódu [21]. Sestavení modelu a propočítání daného experimentu v kódu Serpent 2.30. s vložnou grafitovou zónou různých velikostí bude předmětem dalších výzkumně výpočetních a experimentálních prací na dané problematice grafitových zón.

Model vložné grafitové zóny LR-0 byl sestaven na základě reálně provedeného experimentu viz část 4.2. Aktivní zóna LR-0 byla sestavena ze 6 zkrácených palivových souborů typu VVER-1000 viz 1.1.2. Palivo bylo namodelováno ve věrné geometrii a v rozměrech odpovídající skutečnosti formou pinu, které pomocí zadání do *lattice* a využití symetrie tvořily palivové soubory. Poté byly palivové soubory zkopírovány a seskládány tak, že tvořily symetrickou AZ - velký šestiúhelník, celkem tedy bylo použito 6 palivových souborů. Do dutiny mezi palivové soubory byl namodelován vložný kanál s grafitovou výplní. Nákres modelované geometrie je na *Obr. 17*.



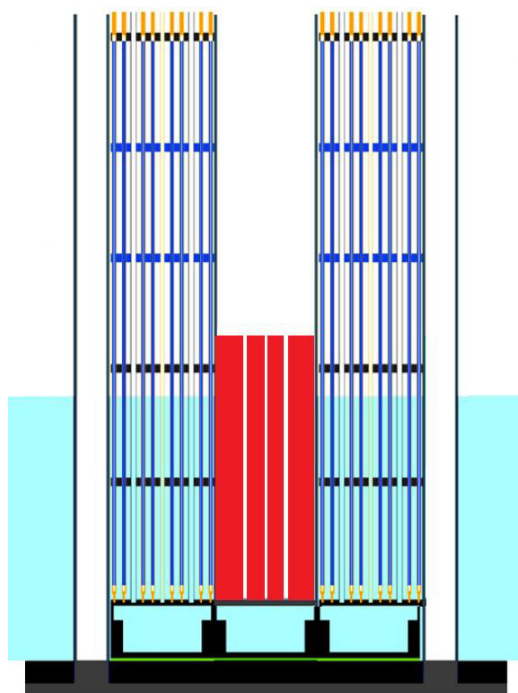
*Obr. 17. Schématický nákres modelované AZ s vložným grafitovým kanálem [21]*

Horizontální řez skrz střed AZ a vložnou zónu je znázorněn na *Obr. 18*. Modelované obohacení paliva bylo ve všech palivových souborech blízké 3.3 %  $^{235}\text{U}$  s hustotou  $10.37 \text{ g/cm}^3$  [21]. Veškeré konstrukční prvky jako nosná deska AZ, vložný kanál s grafitem, koncovky palivových proutků, nádoba reaktoru a další konstrukční součásti byly modelovány ve věrné podobě. Jediné zanedbání bylo využito v palivových souborech v úrovni distančních mřížek. Výška mřížky i její horizontální rozměry byly zachovány, byla však homogenizována s moderátorem, který obklopoval palivové proutky. Toto zjednodušení však vnáší do modelu zanedbatelnou chybu [21]. Výpočet

byl proveden v knihovnách JEFF 3.1, JENDL 3.3, ROSFOND-2010, JENDL 4, a ENDF/B-VII.0.

Jednalo se o kritický výpočet, kde zdrojem neutronů bylo štěpení uranu  $^{235}\text{U}$ . Byl použit příkaz *KCODE*, kterým byly definovány podmínky výpočtu – celkem 40 000 neutronů na jeden cyklus, přičemž bylo počítáno 5 050 cyklů, 50 z těchto cyklů bylo neaktivních, bylo voleno  $k_{eff} = 1$ . Detektor umístěný do středu AZ mezi grafitové bloky, kde bylo měřené spektrum neutronů, byl namodelován jako válec s rozměry reálného detektoru.

Výška hladiny moderátoru pro danou konfiguraci byla určena výpočtem, který je jedním z bezpečnostních kritérií, které povoluje daný experiment na reaktoru LR-0 realizovat.



Obr. 18. Průřez modelovanou AZ, červená zobrazuje grafitový vložný kanál [21]

## 4. Sestavení experimentů na pracovištích LR-0 a LSM

Následující část popisuje sestavení dvou reálných experimentů s grafitovými geometriemi, které byly provedeny a vyhodnoceny za účelem ověření materiálových vlastností reaktorového grafitu z hlediska neutroniky. Jednalo se o jednoduchý benchmarkový experiment s grafitovou krychlí a o komplexní experiment s vložnou zónou reaktoru LR-0.

### 4.1 Popis experimentu s grafitovou krychlí

Tento experiment s grafitovou krychlí a s externím  $^{252}\text{Cf}$  zdrojem neutronů byl proveden v laboratoři LSM, kde se nachází stínící transportní kontejner s tímto neutronovým zdrojem o rozměrech 125 cm výšky a průměru 112 cm. Vnitřní rozměry laboratoře jsou 5x5x7.2 m. V laboratoři se dále nachází zařízení potrubní pošty, které slouží k transportu neutronového zdroje na místo určení a k bezpečné manipulaci. Potrubní poštou je možné zdroj dopravit ze stínícího kontejneru do libovolného místa v laboratoři LSM, při přepojení transportních hadic je možné zdroj dopravovat i na větší vzdálenosti např. na halu reaktoru LR-0. Dále se zde nachází transportně-technologické



Obr. 19. Pohled do laboratoře se stínícím kontejnerem neutronového zdroje  $^{252}\text{Cf}$  (oranžový sud vlevo)

vybavení v podobě portálového jeřábu a menších zdvihacích zařízení sloužící k manipulacím s experimentálním seskupením a s neutronovým zdrojem. Celá laboratoř s neutronovým zdrojem je umístěna v přilehlé budově reaktoru LR-0. Tato budova má zesílené stěny a strop, které zabezpečují dostatečné stínění před ionizujícím zářením. Rozmístění experimentálního vybavení v laboratoři LSNM je znázorněno na *Obr. 19*.

#### 4.1.1 Neutronový zdroj $^{252}\text{Cf}$

Neutronový zdroj  $^{252}\text{Cf}$  je zdrojem štěpného spektra neutronů. Zdroj se skládá ze směsi izotopů Cf, avšak majoritní složkou zdroje je právě  $^{252}\text{Cf}$ .  $^{252}\text{Cf}$  je transuran, který se vyrábí v reaktorech s vysokou hustotou toku teplených neutronů záchytem na  $^{249}\text{Bk}$ . Poločas rozpadu  $^{252}\text{Cf}$  je  $T_{1/2} = 2.645$  let, přičemž se rozpadá  $\alpha$  rozpadem (96.91 %) a pouze 3.09 % se rozpadá samoštěpením. Výtěžek neutronů ze štěpení je průměrně 3.76 neutronů na jedno štěpení, přičemž 1  $\mu\text{g}$   $^{252}\text{Cf}$  emituje  $2.314 \cdot 10^6$  neutronů za sekundu [22]. Spektrum neutronů emitované při štěpení je v podstatě shodné se spektrem  $^{235}\text{U}$  a jedná se o referenční spektrum pro experimenty v neutronové fyzice. Střední energie ze štěpení je 2.16 MeV a nejpravděpodobnější energie neutronů 1.1 MeV. Emise zdroje během tohoto experimentu byla vypočtena ze znalosti emise zdroje na počátku, emise byla zhruba  $4 \cdot 10^8$  n/s [17].

#### 4.1.2 Sestavení grafitové krychle

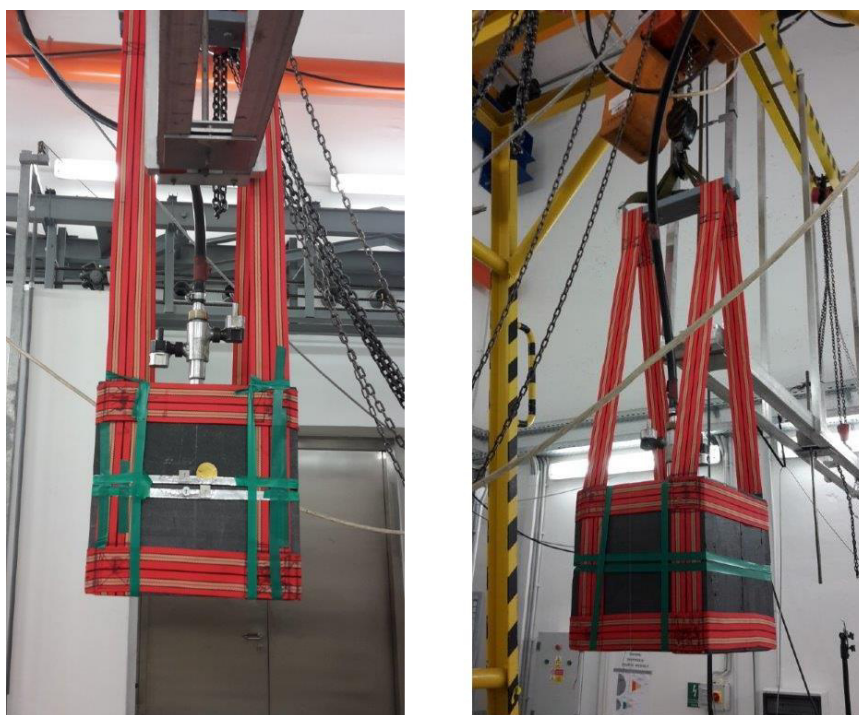
Grafitová krychle byla sestavena z reaktorového grafitu o vysoké atomární čistotě z menších krychlí o rozměrech 15x15x15 cm, které dohromady tvořily celou krychli o rozměrech 30x30x30 cm. Hustota tohoto konkrétního typu reaktorového grafitu byla  $1.72 \text{ g/cm}^3$ . Uprostřed této krychle byl vyvrtán otvor o průměru 25.2 mm a hloubkou 16.3 cm. Hloubka vyvrtaného otvoru je taková, aby po zasunutí koncovky potrubní pošty střed neutronového zdroje byl ve středu krychle. Celá krychle byla umístěna do speciálně vyvinutého látkového závěsu, který menší segmenty drží pohromadě a díky tomuto závěsu je možné s krychlí manipulovat a zavěsit ji na libovolné místo. Grafitová krychle v látkovém závěsu je znázorněna na *Obr. 20*.

#### 4.1.3 Realizace a průběh měření s grafitovou krychlí

Celý experiment byl realizován v laboratoři LSNM a měl dvě části. První část sloužila k naměření únikových spekter neutronů z grafitové krychle, druhá část experimentu sloužila jako korektivní pokus naměřeného spektra. Měření bylo prováděno

jako tzv. absolutní – byl pozorován tvar spektra a zároveň i počet neutronů, který do detektoru dorazil.

Grafitová krychle byla zavěšena pomocí látkového závěsu na kladkostroj zdvihacího zařízení a byla vyzvednuta do výšky 2 m nad podlahu laboratoře. Krychle byla osazena sadou aktivačních folií, které byly přilepeny přímo na povrchu krychle. Tyto aktivační fólie sloužily jako kalibrační nástroj a ověření správnosti měření stilbenovým detektorem. Dále byla do jejího vyvrtaného otvoru ve středu vložena koncovka potrubní pošty a ve vzdálenosti 1 m od středu potrubní pošty a ve výšce 2 m nad podlahou byl umístěn stilbenový detektor s krystalem o průměru 10 mm a výškou 10 mm. Poté byla zkontrolována funkčnost detekční aparatury a byla vyklizena laboratoř. Digitální spektrometr FD-11 byl umístěn mimo laboratoř, aby se tak předešlo jeho aktivaci a zničení neutronovým polem. Poté byl dálkově vstřelen neutronový zdroj potrubní poštou do středu krychle a bylo zahájeno měření. Měření únikových spekter  $^{252}\text{Cf}$  společně s pozadím laboratoře trvalo 6 hodin. Uspořádání celého experimentu je na *Obr. 20*.

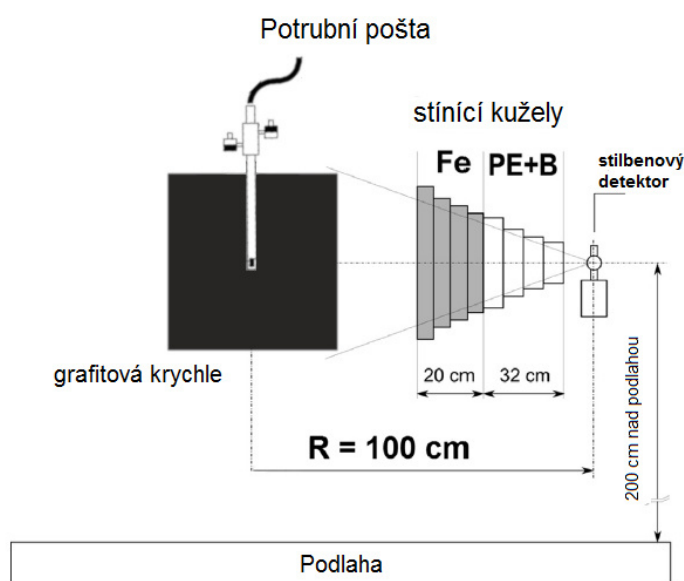


*Obr. 20. Umístění aktivačních folií na povrchu krychle (vlevo) a zavěšení krychle ve speciálním látkovém závěsu společně s potrubní poštou (vpravo)*

Druhá část experimentu měla charakter opravného měření. Prvním měřením bylo naměřeno únikové spektrum  $^{252}\text{Cf}$  z grafitové krychle společně se všemi odrazy neutronů od stěn, od podlahy a s pozadím experimentu celé laboratoře. Druhá část experimentu byla provedena se stínícími kužely, které zastínily celý prostorový úhel mezi krychlí a



detektorem. Tím byla získána složka signálu, která odpovídala pouze signálu od rozptýlených neutronů – tedy jakési pozadí místnosti v době experimentu. Stínící kužely byly umístěny v ose zdroje a detektoru a byly složeny ze dvou částí – první část ze železa, druhá část z bórovaného polyethylenu. Měření pozadí laboratoře trvalo 24 hodin, aby bylo dosaženo vysoké naměřené četnosti a tím i přesnosti měření. Schématické znázornění tohoto experimentu je na *Obr. 21*. Výsledné spektru bylo určeno tak, že od prvního nestíněného naměřeného spektra bylo odečteno druhé spektrum – pozadí. Výsledky měření budou uvedeny v 5. části této práce.



*Obr. 21. Schématické seskupení měření zpětných odrazů a celkového pozadí*

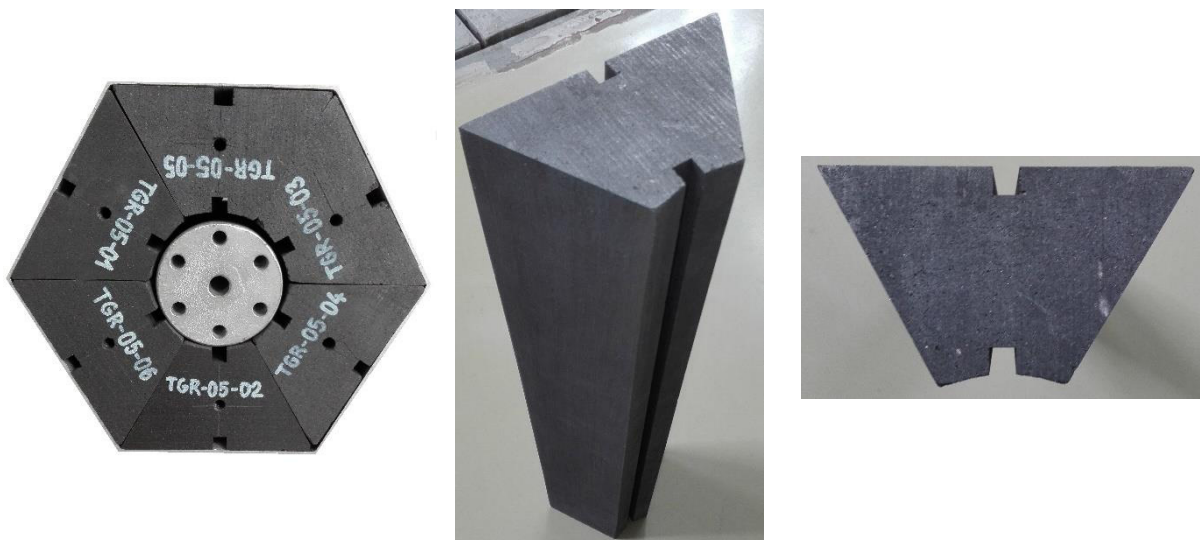
## 4.2 Popis experimentu s vložnou zónou v reaktoru LR-0

Experiment s grafitovou vložnou zónou byl proveden na reaktoru LR-0. Seznámení s reaktorem a jeho experimentálním vybavením bylo popsáno v části 1.1. této práce.

### 4.2.1 Grafitová vložná prisma

Aby bylo možné vložit do AZ reaktoru LR-0 grafitovou prismu, bylo využito suchého experimentálního šestiúhelníkového kanálu. Tento kanál má identické rozměry jako palivový soubor, skládá se z dolní koncovky, která dosedá přesně do nosné desky AZ, a z vlastního kanálu, který má výšku 130 cm. Kanál je vyroben z vysoce čistého hliníku s tloušťkou stěny 5 mm (hliník je na pracovišti LR-0 používán velice často, jelikož se téměř neaktivuje a je pro neutrony téměř transparentním materiálem). Kanál byl vyplněn šesti grafitovými bloky, které mají přibližně tvar lichoběžníku s rozměry delší základny 12.4 cm, kratší základny 4.4 cm, délka stěn 8.3 cm a výška celého bloku

60 cm. Hustota tohoto grafitu je  $1.72 \text{ g/cm}^3$  s čistotou 0.2 ppm bórového ekvivalentu. Jako výplň kanálu sloužila pouze jedna řada grafitových bloků (výška 60 cm zcela dostačovala). Předem bylo vypočteno, že kritická hladina moderátoru bude pod 60 cm, a nebylo tedy nutné grafit nijak vertikálně skládat. Znázornění uspořádání grafitových bloků v suchém kanálu a reálná fotografie grafitového bloku je zobrazena na *Obr. 22*.



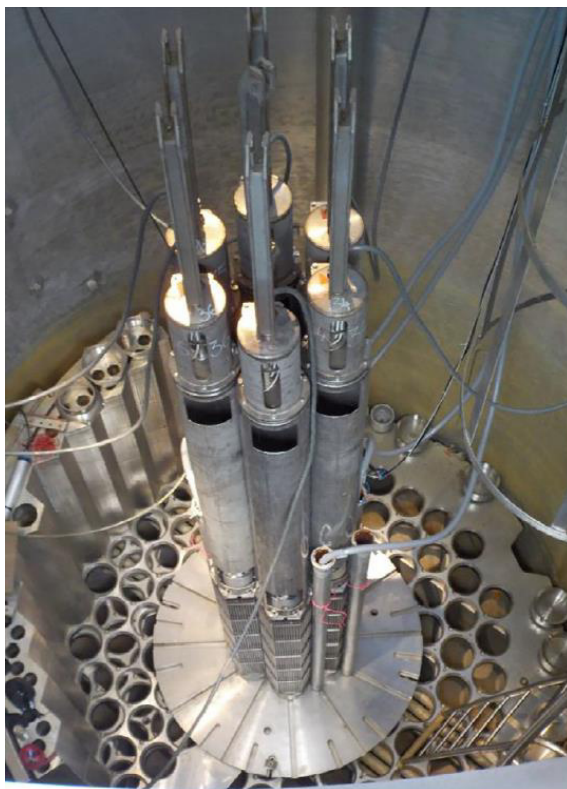
*Obr. 22. Fotografie grafitových bloků – vlevo uspořádání v kanále, uprostřed pohled na celý blok, vpravo pohled na blok shora*

Takto sestavená grafitová vložná zóna byla pomocí portálového jeřábu zavezena do středu AZ. Poté bylo do reaktoru postupně zavezeno palivo, celkem 6 palivových souborů s obohacením 3.3 %  $^{235}\text{U}$ . Předem určené palivové soubory byly osazeny bezpečnostními klastry společně s jejich pohonem. Poté byly do suchých kanálů s definovanými přesnými pozicemi dle požadavků LaP osazeny detektory PMV.

#### **4.2.2 Realizace a průběh měření s vložnou grafitovou zónou**

Experimentální kanál s grafitovou náplní byl v jeho středu osazen stilbenovým detektorem. Detektor byl umístěn tak, aby střed krystalu zasahoval do středu předem vypočteného vodního sloupce moderátoru, krystal byl umístěn zhruba 22 cm ode dna suchého kanálu. Opět byl využit stilbenový krystal o průměru 10 mm a výškou 10 mm. Poté byla zkontrolována funkčnost detekční aparatury a reaktor byl uzavřen stínící plošinou nad AZ. Digitální spektrometr FD-11 byl umístěn na hale reaktoru LR-0. Poté bylo operátory dosaženo kritického stavu pomocí vysunutí bezpečnostních klastrů a načerpání požadovaného množství moderátoru do reaktorové nádoby. Reaktor byl uveden do kritického stavu s velmi malým výkonem, který se rovná tepelnému výkonu zhruba 0.5 mW. V tomto kritickém stavu při tomto výkonu byl reaktor udržován po celou dobu

měření. Dosahování kritického stavu při experimentech je relativně zdlouhavé, samotné naměření neutronového spektra trvalo zhruba 30 min, jelikož v reaktoru bylo dosaženo výkonu, kdy byla velmi vysoká četnost detekovaných neutronů. Měření v tomto případě bylo tzv. relativní – bylo měřeno za účelem zjistit tvar neutronového spektra. Pohled do reaktoru LR-0 na kompletně sestavenou AZ s experimentálním kanálem je na *Obr. 23*. Veškeré naměřené výsledky při tomto experimentu budou uvedeny v následující části této práce.



*Obr. 23. Pohled na uspořádání AZ reaktoru LR-0 při experimentech s vložnou grafitovou zónou*

## 5. Vyhodnocení experimentů a výpočtů

V této části práce budou zhodnoceny veškeré dosažené výpočetní a experimentální výsledky. Budou zhodnoceny oba experimenty, které byly v rámci této práce vypracovány.

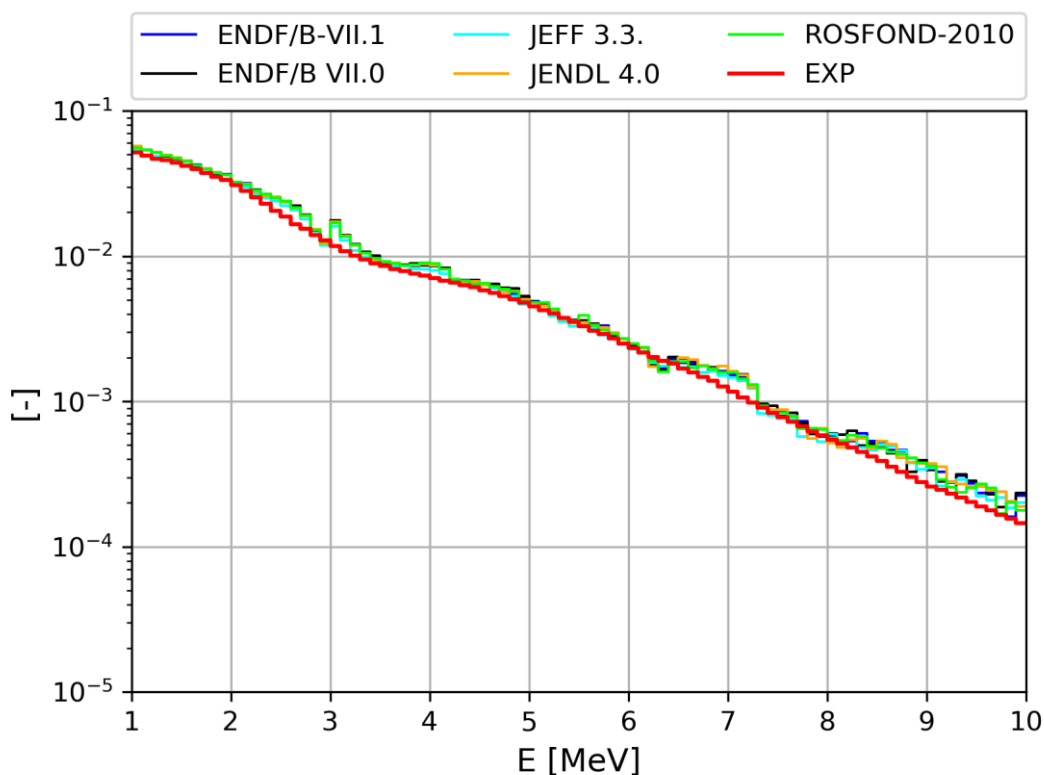
### 5.1 Grafitová krychle

Jak již bylo zmíněno v části 4, byl sestaven a naměřen experiment s grafitovou krychlí. Výsledek tohoto experimentu, tedy naměřené neutronové spektrum, bylo použito jako porovnávací hodnota pro všechny výpočty krychlové geometrie provedené ve výpočetních kódech MCNP 6.1. a Serpent 2.30., informace o sestavených modelech viz část 3.2.1.

V kódu Serpent 2.30. bylo zkoumáno a přepočteno celkem 5 různých knihoven – ENDF/B-VII.1., ENDF/B-VII.0., JEFF 3.3., JENDL 4.0. a ROSFOND-2010. Výpočty byly prováděny vždy se stejnými vstupními parametry, ve vstupních kódech byla vždy změněna pouze knihovna. Jednotlivé výsledky z různých knihoven byly před porovnáním upravovány. Jednotlivé výpočty byly nanormované v rozsahu od 1 do 10 MeV. Normování hodnot bylo provedeno tak, že daná vypočtená četnost v daném bodě byla dělena celkovým součtem všech četností v intervalu od 1-10 MeV. Dále byla data podrobena konvoluci, aby napočtené výsledky odpovídaly rozlišení a citlivosti použitého detektoru. K tomu bylo použito neutronové konvoluční matice odpovídající stilbenovému detektoru s definovaným krystalem, který byl pro toto měření použit. Touto maticí byly výstupní hodnoty násobeny a výsledné spektrum odpovídá rozlišení stilbenového detektoru.

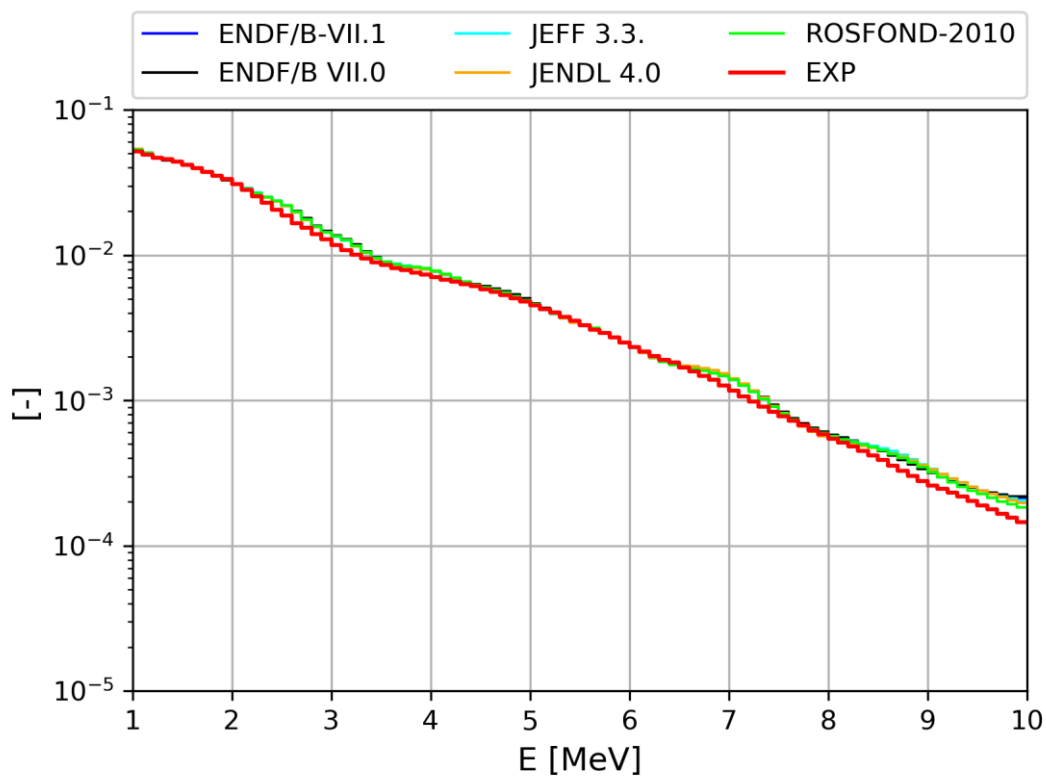
Pro lepší rozlišení rozdílnosti výsledků získaných výpočtem nebyly na *Obr. 24* spektra podrobena konvoluci na detektor. Na *Obr. 24* jsou jasně vidět ostré rezonance, které však stilbenový detektor není schopen rozpoznat. Jedná se převážně o oblast 3.1 MeV, kde má grafit ostrou zápornou rezonanci ve svém absolutním mikroskopickém účinném průřezu, která způsobuje ostrý nárůst hustoty toku neutronů v této oblasti. Další ostré, avšak ne již tak vysoké rezonance lze pozorovat v oblastech 6.4 MeV a v oblasti mezi 7 a 9 MeV. Nad 9 MeV se rozdílnost od experimentu může příkládat nižší přesnosti výpočtu. Výpočet dosahoval velice dobré přesnosti na celém zkoumaném intervalu. V rozmezí 1 až 5 MeV se ve všech výpočtech pohybovala relativní chyba od 0.68 % do

2.3 %, přičemž na nejnižší zkoumané energii byla chyba nejnižší. Na intervalu od 5 do 7 MeV výpočty dosahovaly relativní chyby od 2.3 % do 4 %, maximální relativní chyba ve všech výpočtech byla na nejvyšší zkoumané energii 10 MeV, která se pohybovala v rozmezí od 10.75 – 12.25 %.

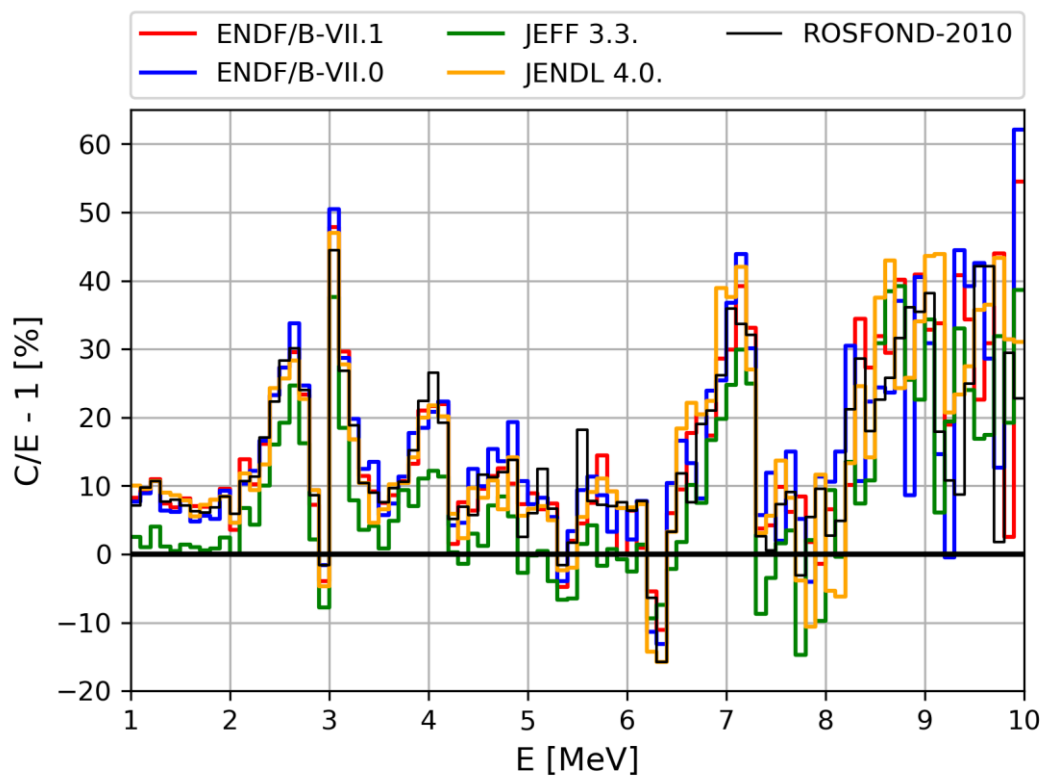


Obr. 24. Neutronová spektra z grafitové krychle v různých jaderných knihovnách vypočtena pomocí kódu Serpent 2.30. – neupravena konvolucí

Tytéž výsledky „rozmazané“ na vlastnosti detektoru pomocí konvoluční matice jsou znázorněny na Obr. 25. Jelikož z Obr. 24 a Obr. 25 nelze spolehlivě rozeznat, která knihovna dosahuje nejlepší shody s experimentem, byly data dále upravována. Grafickým znázorněním přesnosti shody výpočtů s experimentem je Obr. 26, kde je vidět detailnější průběh výsledků všech zkoumaných knihoven. Zpracování  $C/E-1$  vyjadřuje podíl výpočtu ku experimentu, výsledek je v %. Jak je vidět, všechny knihovny zkoumané kódem Serpent dosahovaly podobných výsledků v celém zkoumaném energetickém rozpětí, neurčitost byla u všech knihoven relativně nízká. Všechny výsledky jsou konzervativně nadhodnocené a zároveň dosahují celkem dobré shody s experimentem. Většina výsledků je pod 20% odchylkou, vyjma již dříve diskutovaných oblastí s ostrými rezonancemi. Data byla podrobena konvoluci, jedná se tedy o reálné výsledky v porovnání s detektorem.

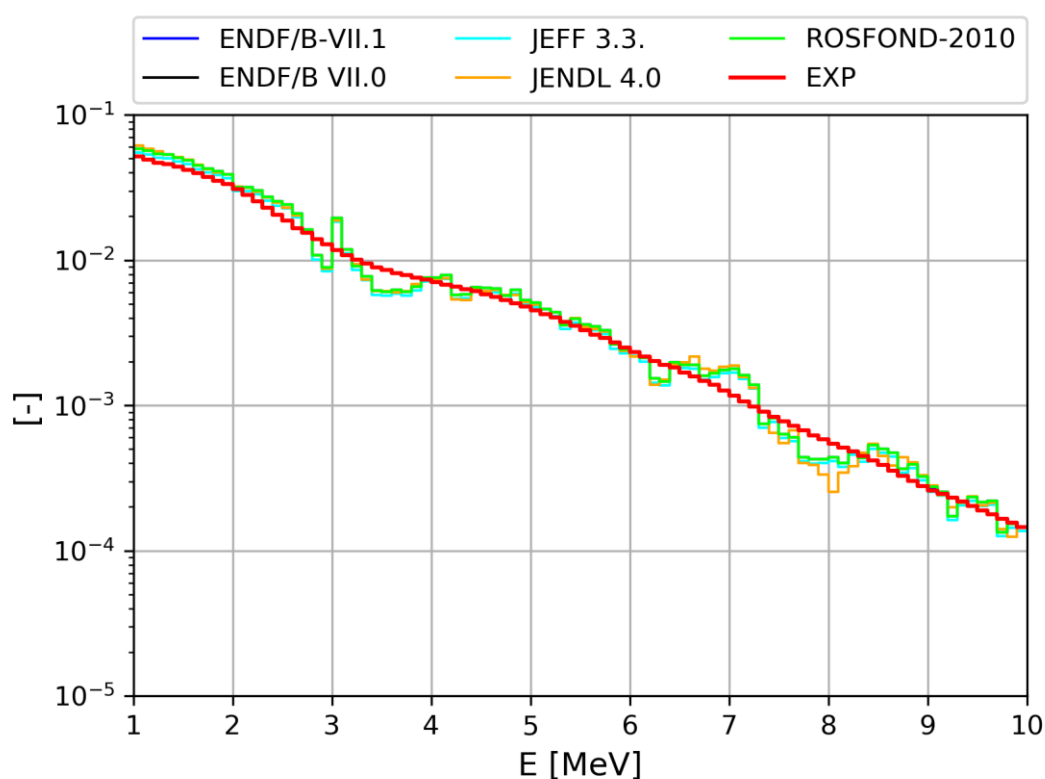


Obr. 25. Neutronová spektra z grafitové krychle v různých jaderných knihovnách vypočtena pomocí kódu Serpent 2.30. – upravena konvolucí



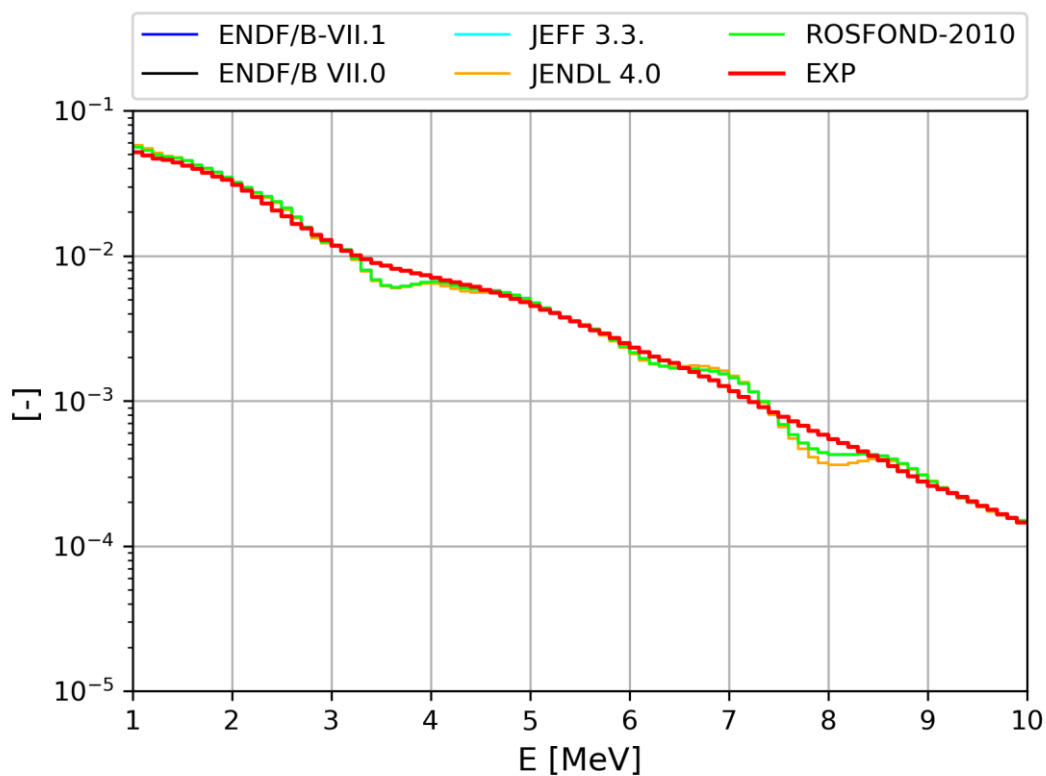
Obr. 26. Porovnání C/E-1 různých jaderných knihoven programem Serpent

Poté byl experiment s grafitovou krychlí přepočten výpočetním kódem MCNP 6.1., aby bylo možné odhalit, jestli jsou odchylky mezi experimentem a výpočtem v jednotlivých knihovnách způsobeny metodikou výpočetního kódu, či jestli jsou odchylky způsobeny samotnými knihovnami. Pomocí MCNP 6.1. bylo přepočteno celkem 5 knihoven, ENDF/B-VII.1., ENDF/B-VII.0., JEFF 3.3., JENDL 4.0. a ROSFOND-2010, stejně jako v předchozím případě při výpočtech kódem Serpent 2.30. Výstupní soubory a data z nich byly zpracovávány stejnou metodikou jako tomu bylo v předchozím případě. Data byla normalizována na celém energetickém rozsahu od 1-10 MeV a byla dále podrobena konvoluci – „rozmazání“ na daný detektor. Neupravená data v porovnání s experimentem jsou znázorněna na *Obr. 27*.

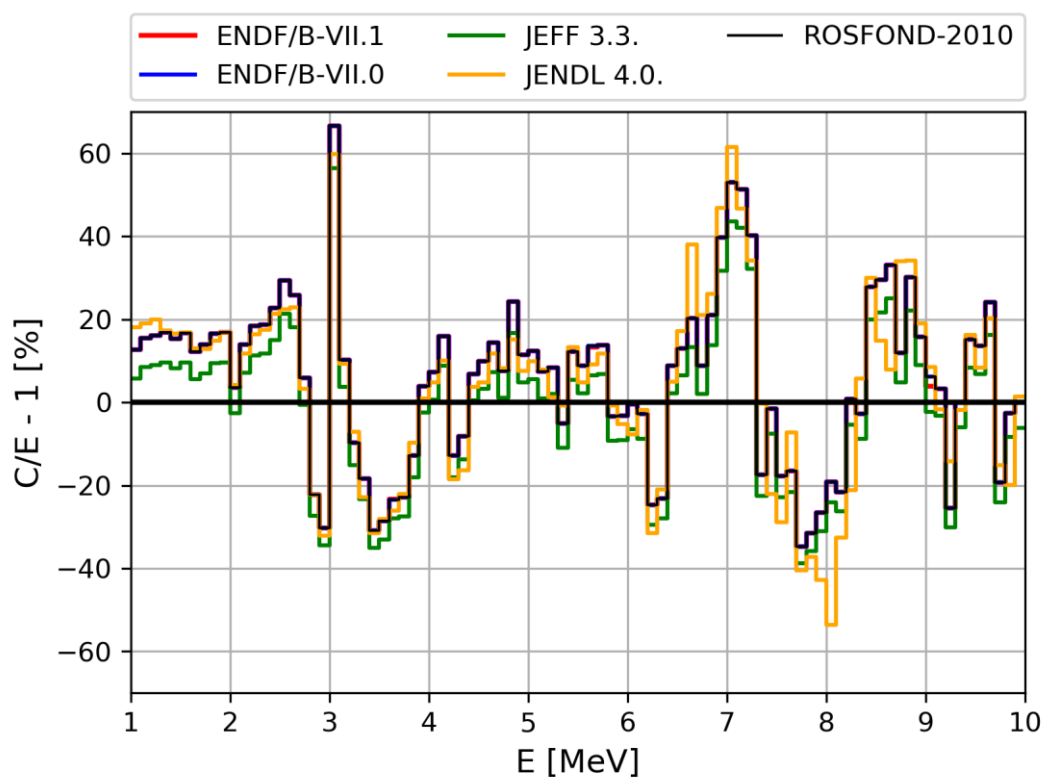


*Obr. 27. Neutronová spektra z grafitové krychle v různých jaderných knihovnách vypočtena pomocí kódu MCNP 6.1. – neupravena konvolucí na detektor*

Jak je vidět na *Obr. 27*, průběh neutronových spekter získaných výpočty v programu MCNP 6.1. je velice podobný v porovnání s programem Serpent 2.30. Opět se objevují ostré rezonance okolo 3.1 MeV, a rovněž v oblasti od 6.5 do 8.5 MeV lze pozorovat ostrý průběh a změny hustoty toku neutronů. Aby bylo možné oba výpočty porovnávat, byly výsledky MCNP podrobny konvoluci a poté stejnou metodikou přepočteny na poměr C/E-1 pro lepší představení výsledků. Výsledky zpracované konvolucí jsou na *Obr. 28*.



Obr. 28. Neutronová spektra z grafitové krychle v různých jaderných knihovnách vypočtena pomocí kódu MCNP 6.1. – upravena konvolucí



Obr. 29. Porovnání  $C/E-1$  různých jaderných knihoven programem MCNP



Jak je velice dobře vidět na *Obr. 29*, program MCNP dosahuje v celém zkoumaném spektru velice dobré shody. Opět lze pozorovat vysokou odchylku na energii okolo 3.1 MeV a velké odchylky na energii 7 a 8 MeV. Tyto vysoké odchylky na těchto energiích jsou pravděpodobně způsobeny rozlišením stilbenového detektoru, jelikož se vyskytují ve všech výsledcích dosažených oběma výpočetními kódy. Při porovnání *Obr. 26* a *Obr. 29* je vidět, že oba programy mají podobný průběh odchylek. Z grafů je rovněž vidět, že MCNP dosahuje vyšší shody s experimentem v určitých částech energetického spektra, Serpent konzervativně nadhodnocuje, avšak jeho odchylka od experimentu je nižší. Na *Obr. 29* nejsou zcela viditelné knihovny ENDF/B-VII.1, ENDF/B-VII.0 a ROSFOND-2010, avšak v grafu vyobrazeny jsou. Knihovny ENDF/B-VII.1, ENDF/B-VII.0 a ROSFOND-2010 se ve většině míst grafu překrývají – výpočty v těchto knihovnách dosáhly velice podobných výsledků, rozdíly mezi knihovnami se vyskytují na 3. desetinném místě, a proto v grafu splývají v jednu celistvou křivku. Z výpočtů a experimentu lze usuzovat, že výpočetní kódy dosahují dobré shody, avšak pro detailnější rozbor by bylo nutné provést měření s detektorem, který by měl lepší rozlišení v daném energetickém spektru a bylo by vhodné zvolit nižší krok mezi jednotlivými hodnotami.

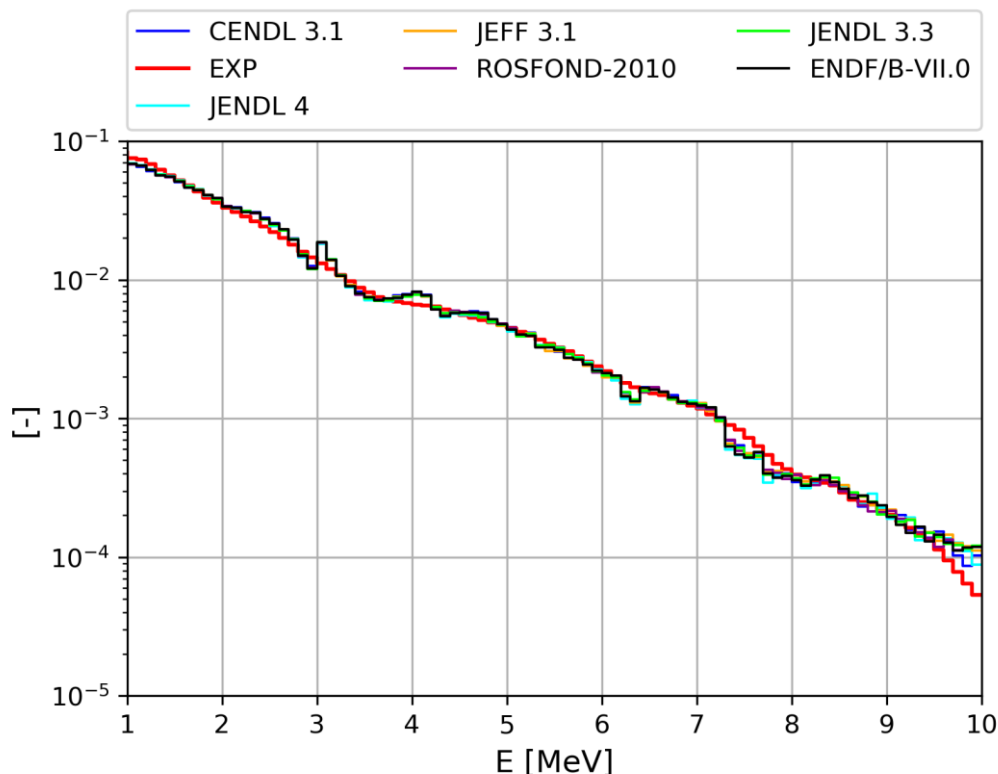
Pro úplnou názornost bylo provedeno srovnání dosažených výsledků z jednotlivých kódů. Toto porovnání MCNP 6.1., Serpent 2.30. a experimentu vždy pro danou knihovnu lze nalézt v podobě grafů v příloze B.

## 5.2 Grafitová vložná zóna LR-0

V této části budou popsány výsledky, které navazují na experiment popsany v části 4.2 této práce. Výsledkem bylo naměřené neutronové spektrum v centru aktivní zóny reaktoru LR-0 s grafitovou prismou. Toto spektrum bylo porovnáno s výsledky dosaženými výpočetním kódem MCNP 6.1., informace o sestaveném modelu viz 3.2.2.

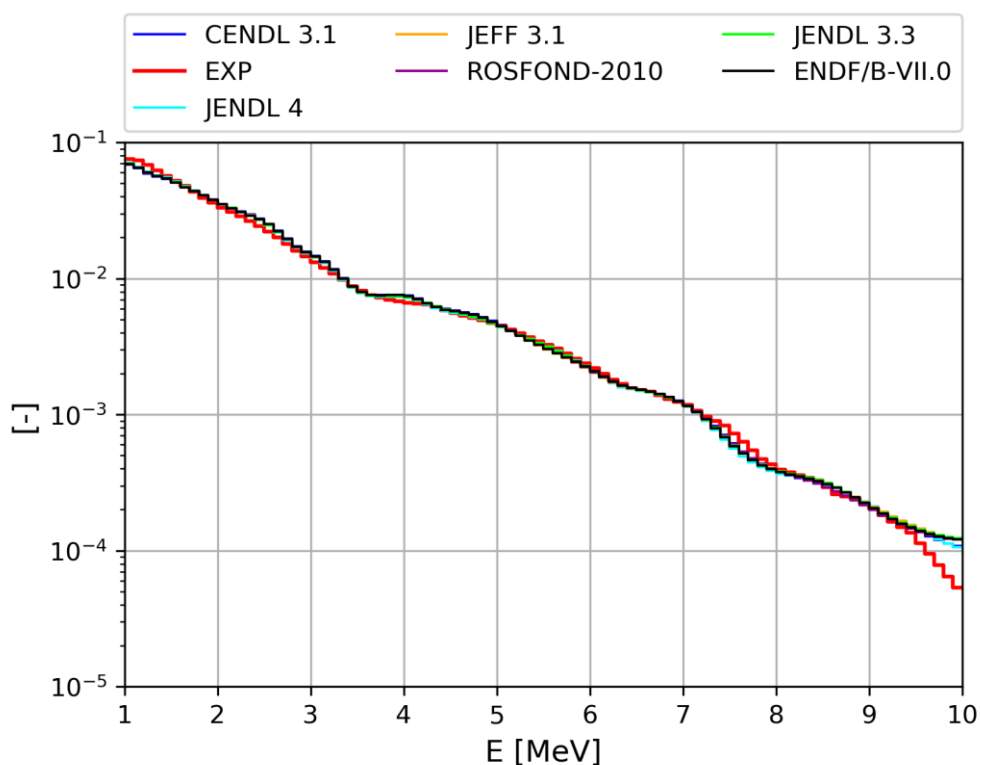
V tomto kódu bylo provedeno celkem 6 výpočtů v následujících jaderných knihovnách: ENDF/B-VII.0., CENDL 3.1., JEFF 3.1., JENDL 3.3., ROSFOND-2010 a JENDL 4.0. Výpočty byly prováděny se vstupními parametry, které byly již dříve specifikovány, upravena byla vždy jen zkoumaná knihovna. Výsledné spektrum bylo nanormováno v celém svém energetickém rozsahu stejnou metodikou jako předchozí experimenty, tedy od 1 do 10 MeV. Normování všech hodnot probíhalo tak, že hodnoty v daném bodě byly děleny sumou všech četností v celém energetickém rozsahu – od 1 do 10 MeV. Poté byla data dále zpracována násobením konvoluční maticí, která dané

vypočtené spektrum „rozmazala“ na vlastnosti a rozlišení, které odpovídá detektoru použitému při měření v AZ. Neupravené výsledky výpočtu konvolucí v porovnání s měření v reaktoru LR-0 jsou znázorněny na *Obr. 30*.

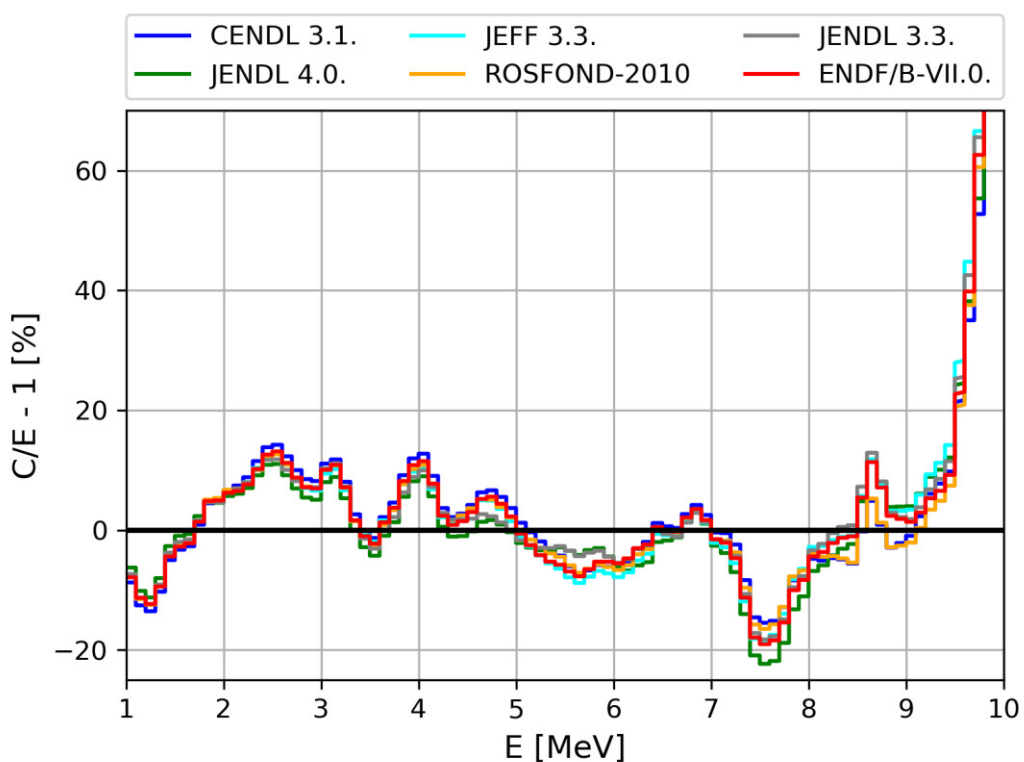


*Obr. 30. Vypočtená neutronová spektra ve vložné zóně LR-0 v různých jaderných knihovnách vypočtena pomocí kódu MCNP 6.1. – neupravena konvolucí na detektor*

Jak je vidět z *Obr. 30*, shoda experimentálního měření a modelovaných spekter je v celém rozsahu měření velice dobrá, i když nebyla provedena konvoluce spekter. Opět se zde vyskytuje ostrý nárůst hustoty toku neutronů na energii 3.1 MeV, jehož vznik byl vysvětlen již dříve. Další nesoulady výpočtu a měření si lze povšimnout mezi 7.3 a 8 MeV. Pokud se podíváme na *Obr. 31*, vidíme průběh vypočtené hustoty toku neutronů, které respektuje rozlišení detektoru. Použitím konvoluční matice bylo dosaženo reálného porovnání experimentu a výpočtů. Mírné nesoulady v některých oblastech, které se nacházejí mezi 2.5 a 3 MeV mohou být způsobeny tím, že se v průběhu mikroskopického účinného průřezu grafitu nachází na energii 2.075 MeV ostrá kladná rezonance, která byla doposud skryta v detekčních a výpočetních krocích, a proto na 2 MeV dochází k propadu hustoty toku neutronů. Výsledný graf výsledků v porovnání s experimentem po „rozmazání“ je znázorněn na *Obr. 31*.



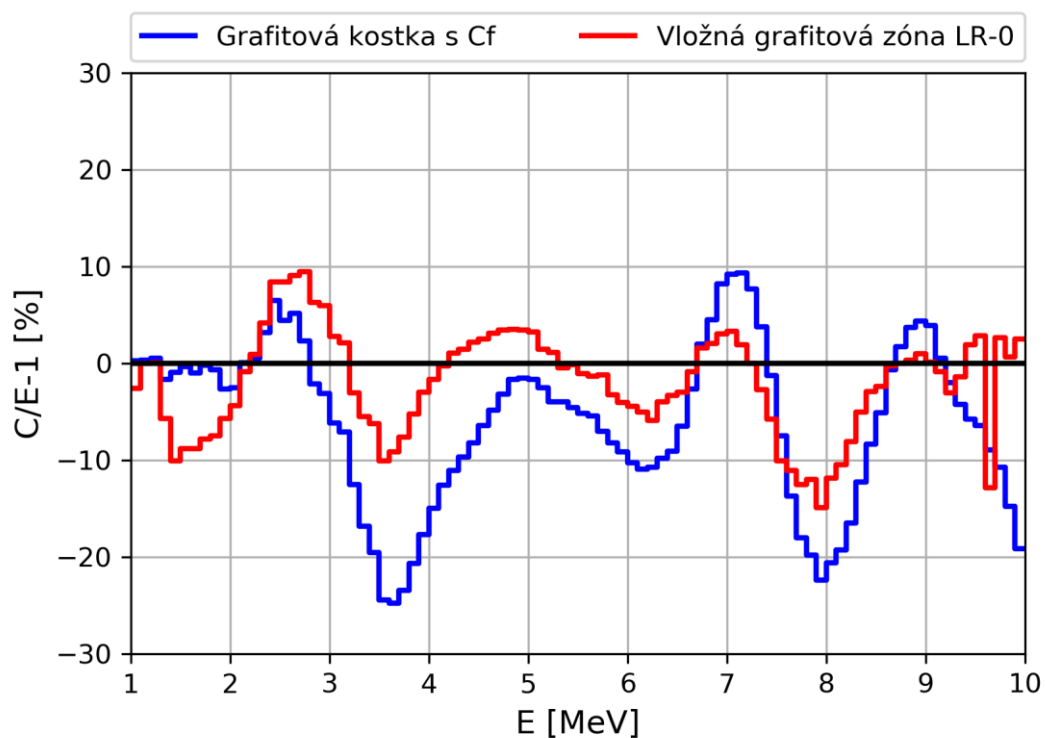
Obr. 31. Vypočtená neutronová spektra ve vložné zóně LR-0 v různých jaderných knihovnách vypočtena pomocí kódu MCNP 6.1. – upravena konvolucí na detektor



Obr. 32. Porovnání  $C/E-1$  různých jaderných knihoven programem MCNP pro vložnou grafitovou zónu LR-0

Pro lepší rozlišení odchylek výpočtu a experimentu byla data upravena jako v předchozích případech. Byl sestaven *Obr. 32*, který velice detailně ukazuje průběh odchylek výpočtů a experimentu. Na *Obr. 32* je jasně vidět velice dobrá shoda od energie 1 až 7 MeV, kde jsou odchylky mezi výpočtem a měřením pod 15 %. Od energie 7 MeV dochází k velkému rozkolísání výsledků a na energii 10 MeV je odchylka experimentu téměř 100%. Rozkolísání a zhoršení shody výpočtu a experimentu v oblasti mezi 7 až 9 MeV je pravděpodobně způsobeno velice zvládným průběhem mikroskopického účinného průřezu grafitu. Další možným problémem, který v reaktoru nastává je fakt, že v reaktoru máme kromě neutronů vzniklých ze štěpení  $^{235}\text{U}$  i neutrony vzniklé štěpením  $^{238}\text{U}$  a dalších transuranů. Dalším zdrojem vysokoenergetických neutronů v reaktoru mohou být různé  $(\gamma, n)$  reakce na  $^{238}\text{U}$  a dalších materiálech, které se v AZ nachází. Tento fakt zanáší do měření v reaktoru neurčitost a na takto vysokých energiích neutronů proto podíl C/E-1 začíná extrémně stoupat. Další parametr, který mohl ovlivnit výsledky je fakt, že v AZ byla vložena pouze jedna pozice vyplněná grafitem. Pro vyšší rozlišení chování hustoty toku neutronů v grafitovém prostředí by bylo nutné sestavit větší vložnou grafitovou zónu, na které by se měření dalo opakovat v různých pozicích umístění detektoru.

V porovnání *Obr. 32*, *Obr. 29* a *Obr. 26* by se mohlo nesprávně usuzovat, že experimenty jsou zcela odlišné, i když využíváme k daným integrálním experimentům různé zdroje neutronů s velice podobným neutronovým spektrem, viz *Obr. 6*. Proto bylo provedeno srovnání obou experimentů. Byla vybrána referenční knihovna ENDF/B-VII.0, která byla zkoumána v obou experimentech. Bylo provedeno porovnání C/E-1, přičemž byly analyzovány výsledky výpočtů bez „rozmazání“ na detektor. Bylo totiž usouzeno, že výsledky, kterých je dosaženo ve vyšších energiích mají vyšší relativní odchylku, a proto jejich rozmazání může do porovnání vnášet ještě vyšší neurčitost. Toto porovnání je graficky znázorněno na *Obr. 33*. Rozdílné chování průběhu hustoty toku neutronů v obou experimentech, které je pozorovatelné na *Obr. 33* může být způsobeno i úhlovou závislostí obou experimentů a tím, že v reaktoru se nachází voda, přičemž experiment s grafitovou krychlí se nacházel v laboratoři ve vzduchu. Z tvaru obou spekter však můžeme usuzovat, že oba experimenty mají stejný tvarový průběh hustoty toku neutronů, a proto lze tyto experimenty mezi sebou porovnávat.



Obr. 33. Porovnání obou typů experimentů,  $C/E-1$  grafitové kostky (modrá křivka) a  $C/E-1$  vložné zóny LR-0 (červená křivka) [17]

Oba experimenty s grafitem prokázaly, že materiálové vlastnosti grafitu v rozmezí energií od 1 do zhruba 7 MeV jsou velice dobře definovány a popsány ve všech zkoumaných jaderných knihovnách viz Obr. 26, Obr. 29 a Obr. 32. Od energie 7 MeV výše se už výsledky rozcházejí. Tuto oblast by bylo vhodné prozkoumat detailněji dalšími experimenty s neutrony vyšších energií. Další ověřování materiálových vlastností grafitu z hlediska neutronických vlastností by bylo vhodné v nižších energiích, od 1 MeV níže. Toto zkoumání by mohlo být předmětem dalších experimentů a prací.

## Závěr

Předkládaná práce se zabývá ověřováním materiálových vlastností reaktorového grafitu z hlediska neutronických vlastností. V této práci byly provedeny dva experimenty s grafitovými geometriemi, jeden s externím zdrojem neutronů s grafitovou krychlí a druhý v aktivní zóně experimentálního reaktoru LR-0 s vloženou grafitovou zónou. Tyto experimenty měly za úkol prozkoumat a ověřit shodu experimentálních a výpočetních výsledků – tedy ověřit, zda data prezentovaná v jaderných knihovnách jsou správná a zda-li je možné tato data považovat za dostatečně přesná pro výpočty a návrhy nového typu reaktoru HTGR. Část experimentálních i výpočetních výsledků, kterých bylo v rámci této práce dosaženo, byla prezentována v květnu 2019 na mezinárodní konferenci ICONE 27 formou článku ve studentské části konference, viz [17]. Tento článek dostal ocenění za jeden z nejlepších evropských příspěvků ve studentské části konference.

První dvě části práce mají řešební charakter a byly zhotoveny za účelem seznámení se s pracovištěm a detekční metodou využívající scintilačního detektoru. První část se detailně zabývá popisem pracoviště reaktoru LR-0, část dvě se zabývá scintilační spektrometrií, které bylo využito při měření. Další část se zabývá výpočetními kódy, kterých bylo v této práci využito – MCNP 6.1. a Serpent 2.30. V rámci této kapitoly jsou popsány vytvořené vstupní soubory pro oba typy experimentů. Vstupní soubory, které sloužily jako vstup pro MCNP 6.1., byly sestaveny za pomoci konzultanta práce, přičemž některé vstupy již existovaly. Vstupní soubory do kódu Serpent 2.30. byly sestavovány zcela od začátku ručně, žádné rozpracované ani podobné soubory nebyly k dispozici. Práce dále pokračuje popsáním experimentů, které byly provedeny za účelem získání výsledků z experimentálního měření. Všechny experimenty byly prováděny na pracovištích reaktoru LR-0.

Poslední část práce je věnována shrnutí všech dosažených výsledků jak už experimentálních, tak i výpočetních. Pro vypracování této práce bylo vypočteno více než 25 modifikací vstupních souborů do kódu Serpent, přičemž ne všechny soubory byly použity z důvodu jejich přesnosti a relativní odchylky výpočtu. Je zde popsáno, jak byla data analyzována a upravována pro lepší reprodukci výsledků. Formou komentovaných grafů jsou zde prezentovány výsledky obou experimentů. První část této kapitoly je zaměřena na zhodnocení experimentu a výpočtu s grafitovou krychlí, druhá část se zabývá experimentem a výpočty na LR-0. Experiment s grafitovou krychlí ukázal, že

i s použitím velice jednoduché geometrie, a s externím zdrojem neutronů, lze pozorovat stejný tvar neutronového spektra, které bylo naměřeno v reaktoru LR-0 s vloženou zónou. Obě naměřená neutronová spektra mají ve své podstatě velice podobný průběh, pozorujeme shodu s výpočty v oblasti od 1 do zhruba 7 MeV, pomineme-li špatně rozlišitelné rezonance v okolí 2 a 3.1 MeV. Experiment v reaktoru LR-0 zase ukázal, že všechny zkoumané jaderné knihovny počítají velice podobně, nebyla nalezena žádná knihovna, která by výsledky nějak zásadně ovlivňovala. Problémová oblast, jak již bylo zmíněno, nastává v energiích od 7 MeV výše. Zde se výsledky v obou experimentech začínají rozcházet. Interpretace těchto výsledků je taková, že v této oblasti ve štěpném spektru  $^{252}\text{Cf}$  už není tak velké množství neutronů s touto energií, které by mohly být detekovány a měření se tak dostává do vyšších nejistot. V reaktoru LR-0 je tento nesoulad přisuzován neutronům, které nepocházejí ze štěpení  $^{235}\text{U}$ , ale z jiných reakcí, které lze v reaktoru najít. Vyšší neurčitost v obou případech může být způsobená i metodikou vyhodnocení, samotným detektorem a nastavením detekční aparatury či přesností samotného výpočtu. Pro další detailnější ověření vlastností grafitu v širším energetickém spektru neutronů by bylo vhodné se zaměřit i na přeměření nižších energií, tedy energií pod 1 MeV. Toto detailnější prozkoumání, které by odhalilo chování neutronů a jejich energie v nižších hodnotách energie, by bylo možné provést v další práci, která by mohla na tuto předkládanou práci navazovat. V závěru této části je provedeno srovnání obou experimentů, které prokazuje, že experimenty jsou si velice podobné a můžeme je spolu porovnávat. Díky tomu máme dva velice odlišné experimenty zkoumající jeden jev. Je tedy možné oba experimenty sledovat a porovnávat jejich výsledky i v nižších energiích, než ve kterých bylo v této práci měřeno. Závěrem lze stanovit, že jaderná data ve všech knihovnách podávají celkem přesné výsledky a lze je tedy považovat za ověřené pro návrh nového typu reaktoru HTGR.

## Reference

- [1]. Bolewski A., Ciechanowski M., Dydejczyk A., Kreft A. *A practical method for measuring the boron equivalent of graphite impurity*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 237. 2005. s. 602-612.
- [2]. Juříček V., Rypar V., Svoboda Č. *Předprovozní bezpečnostní zpráva reaktoru LR-0*. Centrum výzkumu Řež, oddělení Provozní Reaktorové Fyziky 7293, Revize č.0. 2010
- [3]. *Reaktor LR-0 [online]*, Centrum výzkumu Řež s.r.o. 2013, [vid. 12.1.2019]  
Dostupné z: <http://reaktory.cvrez.cz/reaktor-lr-0/>
- [4]. *Nuclear Fuel for VVER Reactors [online]*. TVEL Fuel company of Rosatom. Moskva. 2011. 12 s. [vid. 17.12.2018] Dostupné z:  
[https://www.tvel.ru/wps/wcm/connect/tvel/tvelsite.eng/resources/b00eb08047178c38abfbfb39942cc531/brochure\\_nuclea\\_eng.pdf](https://www.tvel.ru/wps/wcm/connect/tvel/tvelsite.eng/resources/b00eb08047178c38abfbfb39942cc531/brochure_nuclea_eng.pdf)
- [5]. Losa, E., Košťál, M., Rypar, V., Novák, E., Juříček, V. *Effect of inserted fluoride salts on criticality in the LR-0 reactor*. 2015. Annals of Nuclear Energy. Volume 81. ISSN 0306-4549.
- [6]. Švadlenková, M., Heraltová, L., Juříček, V., Košťál, M., Novák, E. *Gamma spectrometry of short living fission products in fuel pins*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, Volume 739, 2014, strana 55–62, ISSN 0168-9002
- [7]. Knoll Glenn F. *Radiation Detection and Measurement*. John Wiley & Sons Inc. Michigan. 1999. 3rd edition
- [8]. Grupen, C., Shwartz B. A., Spieler H., *Particle detectors*. New York: Cambridge University Press, 2008. 2nd edition. ISBN 0521840066.
- [9]. Miglierini M., Tichý M. *Detektory ionizujícího žiarenia*. Přednášky k předmětu Detekce záření. Fakulta jaderná fyzikálně inženýrská, České vysoké učení technické v Praze. 2017
- [10]. Veškrna M., Matěj Z., Mravec F., Přenosil V., Cvachovec F., Košťál M. *Digitalized two parametric system for gamma/neutron spectrometry*. AND RPSD 2014 – 18th Topical Meeting of the Radiation Protection & Shielding Division of ANS. Knoxville. 2014. American Nuclear Society
- [11]. Hrnčiarová, Z. *Metoda Monte Carlo a její realizace*. Masarykova Univerzita, Přírodovědecká fakulta, Ústav matematiky a statistiky, Bakalářská práce. 2015



- [12]. Fabian F., Klüber Z. *Metoda Monte Carlo a možnosti jejího uplatnění*. 1998. ISBN 80-7175-058-1.
- [13]. Lee S. K., Cho Y. H., Kang B. H., Lee W.G., Kim J. K., Kim G. D., Galunov N., Kim Y. K. *Scintillation Properties of Composite Stilbene Crystal for Neutron Detection*. Progress in Nuclear Science and Technology. 2011. DOI 10.15669/pnst.1.292
- [14]. Leppänen J. *The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013*. Annals of Nuclear Energy 82. 2015
- [15]. Leppänen J. *Serpent – a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. User's manual*. VTT Technical Research Centre of Finland. 2015
- [16]. *Monte Carlo Methods, Codes, & Applications Group [online]*. Los Alamos National Laboratory. [vid. 6.3.2019] Dostupné z: <https://mcnp.lanl.gov/>
- [17]. Peltan T., Košťál M., Prehradný J., Schulc M., Dostál V., *Validation of graphite cross section in various integral experiments*. Proceedings of ICONE 27 Conference 2019. Tsukuba Japan
- [18]. *Internetový manuál kódu Serpent [online]*. [vid. 11.3.2019] Dostupné z: [http://serpent.vtt.fi/mediawiki/index.php/Main\\_Page](http://serpent.vtt.fi/mediawiki/index.php/Main_Page)
- [19]. McConn R.J., Gesh C.J., Pagh R.T., Rucker R.A., Williams III R.G. *Copendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling*. Pacific Northwest National Laboratory, Washington. 2011. Revision 1
- [20]. Capote, R. *Updating and Extending the IRDF-2002 Dosimetry Library*. Journal of ASTM International, Vol. 9. 2012. ISSN 1546-962X
- [21]. Košťál, M., Veškrna M., Cvachovec F., Jánký B., Novák E., aj. *Comparison of fast neutron spectra in graphite and FLINA salt inserted in well-defined core assembled in LR-0 reactor*. Annals of Nuclear Energy, 2015, s. 216-225. ISSN 0306-4549. doi:10.1016/j.anucene.2015.04.011.
- [22]. Martin R.C., Knauer J.B., Balo P.A. *Production, distribution and applications of californium-252 neutron sources*. Applied Radiation and Isotopes 53. 2000. s. 785-792.

## Přílohy

### A. Vstupní soubor kódu Serpent 2.30.

```
set title "graphite cube neutron spectra 1 m v kvadriku modifikace A.1"
```

```
%library ENDF 7.1.
```

```
%temperature 295 K
```

```
% --- geometry of cube ---
```

```
surf sc cuboid 0 105 -15 15 -15 15 %kvadrik cely
```

```
surf sai cuboid 0 15 -15 15 -15 15 %grafitova geometrie
```

```
% --- graphite cube and source ---
```

```
cell cc1 0 fill Z -sai
```

```
cell cc2 0 air sai -sc
```

```
cell cc3 0 outside sc
```

```
% --- Cf neutron source in rabbit ---
```

```
pin TOPR2 % Top of rabbit 2
```

```
air 0.7
```

```
alu 0.8
```

```
air 1.1
```

```
alu 1.25
```

```
grp
```

```
pin R2ALC % rabbit 2 Al cap
```

```
alu 0.6925
```

```
air 0.7
```

```
alu 0.8
```

```
air 1.1
```

alu 1.25

grp

pin R2ALCTE                      % rabbit 2 Al cap + textile

textile 0.475

alu 0.6925

air 0.7

alu 0.8

air 1.1

alu 1.25

grp

pin R2ALCS                      %rabbit 2 AL cap + steel cyrcle

steel 0.413

void 0.475

alu 0.535

air 0.7

alu 0.8

air 1.1

alu 1.25

grp

pin R2ALTS                      %rabbit 2 Al tube + steel

steel 0.4705

void 0.475

alu 0.535

air 0.7

alu 0.8

air 1.1

alu 1.25

grp

pin R2ALTSCF                      %rabbit 2 Al tube + steel + Cf

calif 0.1955

steel 0.4705

void 0.475

alu 0.535

air 0.7

alu 0.8

air 1.1

alu 1.25

grp

pin R2ALTTE                      %rabbit 2 Al tube + textile

textile 0.475

alu 0.535

air 0.7

alu 0.8

air 1.1

alu 1.25

grp

pin R1ALC                      %rabbit 1 Al cap

alu 0.6925

air 1.1

alu 1.25

grp

pin R1B2                      %rabbit 1 bottom 2

alu 0.2

air 1.1

alu 1.25

grp

pin R1B1                      %rabbit 1 bottom 1

alu 1.25

grp

% --- Axial Cf source ---

surf s1 pz -3.0

surf s2 pz -2.0

surf s3 pz -1.5

surf s4 pz -1.3

surf s5 pz -0.9

surf s6 pz -0.735

surf s7 pz -0.57

surf s8 pz -0.17

surf s9 pz 0.43

surf s10 pz 1.273

surf s11 pz 1.4

surf s12 pz 1.73

surf s13 pz 1.98

% --- vertical layers of Cf source ---

cell c1 Z grp -s1

cell c2 Z fill R1B1 s1 -s2

cell c3 Z fill R1B2 s2 -s3

cell c4 Z fill R1ALC s3 -s4

cell c5 Z fill R2ALC s4 -s5

cell c6 Z fill R2ALCTE s5 -s6

cell c7 Z fill R2ALTTE s6 -s7

cell c8 Z fill R2ALTS s7 -s8

cell c9 Z fill R2ALTSCF s8 -s9

cell c10 Z fill R2ALTS s9 -s10

cell c11 Z fill R2ALCS s10 -s11

cell c12 Z fill R2ALCTE s11 -s12

cell c13 Z fill R2ALC s12 -s13

cell c14 Z fill TOPR2 s13

% --- materials ---

mat grp -1.720 rgb 64 64 64 %sediva grafit

6000.80c -1 %C\_nat

mat alu sum rgb 0 255 255 % svetle modra hlinik

13027.80c -0.935000003 %Al27

29063.80c -0.02945459 %Cu63

29065.80c -0.01354516 %Cu65

12024.80c -0.005846262 %Mg24

12025.80c -0.000771009	%Mg25
12026.80c -0.000882745	%Mg26
25055.80c -0.007	%Mn55_nat
26054.80c -0.000141139	%Fe54
26056.80c -0.002297544	%Fe56
26057.80c -5.40094E-05	%Fe57
26058.80c -7.31363E-06	%Fe58
14028.80c -0.00229687	%Si28
14029.80c -0.000120796	%Si29
14030.80c -8.23678E-05	%Si30
30064.80c -0.000475508	%Zn64
30066.80c -0.00028133	%Zn66
30067.80c -4.19702E-05	%Zn67
30068.80c -0.000194798	%Zn68
30070.80c -6.63103E-06	%Zn70
22046.80c -7.92005E-05	%Ti46
22047.80c -7.29774E-05	%Ti47
22048.80c -0.000738447	%Ti48
22049.80c -5.53216E-05	%Ti49
22050.80c -5.40485E-05	%Ti50
28058.80c -0.000335988	%Ni58
28060.80c -0.00013388	%Ni60
28061.80c -5.91679E-06	%Ni61
28062.80c -1.91741E-05	%Ni62

28064.80c -5.04075E-06	%Ni64
mat steel sum rgb 255 0 255	% divoka ruzova
6000.80c -0.0003	%C_nat
25055.80c -0.020000001	%Mn55_nat
16032.80c -0.000284009	%S32
16033.80c -2.34482E-06	%S33
16034.80c -1.36359E-05	%S34
16036.80c -6.73121E-08	%S36
15031.80c -0.00045	%P31
14028.80c -0.00689061	%Si28
14029.80c -0.000362389	%Si29
14030.80c -0.000247112	%Si30
24050.80c -0.00793001	%Cr50
24052.80c -0.159028897	%Cr52
24053.80c -0.018379827	%Cr53
24054.80c -0.004661395	%Cr54
28058.80c -0.067197654	%Ni58
28060.80c -0.026775942	%Ni60
28061.80c -0.001183358	%Ni61
28062.80c -0.003834819	%Ni62
28064.80c -0.00100815	%Ni64
7014.80c -0.000996041	%N14
7015.80c -3.94092E-06	%N15
26054.80c -0.038415303	%Fe54



Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze

26056.80c -0.625345603	%Fe56
26057.80c -0.014700267	%Fe57
26058.80c -0.001990624	%Fe58
mat textile -0.185 rgb 255 255 0	%zluta - plst (felt_compendium)
1001.80c 0.384007834	%H1
1002.80c 4.4166E-05	%H2
6000.80c 0.316901	%C_nat
7014.80c 0.109953875	%N14
7015.80c 0.000406125	%N15
8016.80c 0.188227493	%O16
8017.80c 0.000458507	%O17
mat air -0.001205 rgb 204 255 255	% zelenkava vzduch (air_compendium)
6000.80c 0.00015	%C_nat
7014.80c 0.781544	%N14
7015.80c 0.002887	%N15
8016.80c 0.210236	%O16
8017.80c 0.000512	%O17
18036.80c 1.57179E-05	%Ar36
18038.80c 2.95207E-06	%Ar38
18040.80c 0.00465233	%Ar40
mat calif -6.55 rgb 255 130 4	%oranzova, Cf zdroj
98252.80c -1	%Cf252

```
% --- input parameters definitions ---

set nps 20000000000 20000

src californium sm calif sc c9 sr 98252.80c 18 %zdrojovy clen Cf source

set bc 1                %okrajova podminka vakuum

set acelib "/home/mpiuser/mpiuser/opt/Serpent/xsdata/serpentxs"

set declib "/home/mpiuser/mpiuser/opt/Serpent/xsdata/sss_endfb7.dec"

set nfylib "/home/mpiuser/mpiuser/opt/Serpent/xsdata/sss_endfb7.nfy"

% --- detector definition ---

det Stilben dx 100 104 1 dy -2 2 1 dz -2 2 1 de mereni

ene mereni 2 112 0.8e0 1.2e1

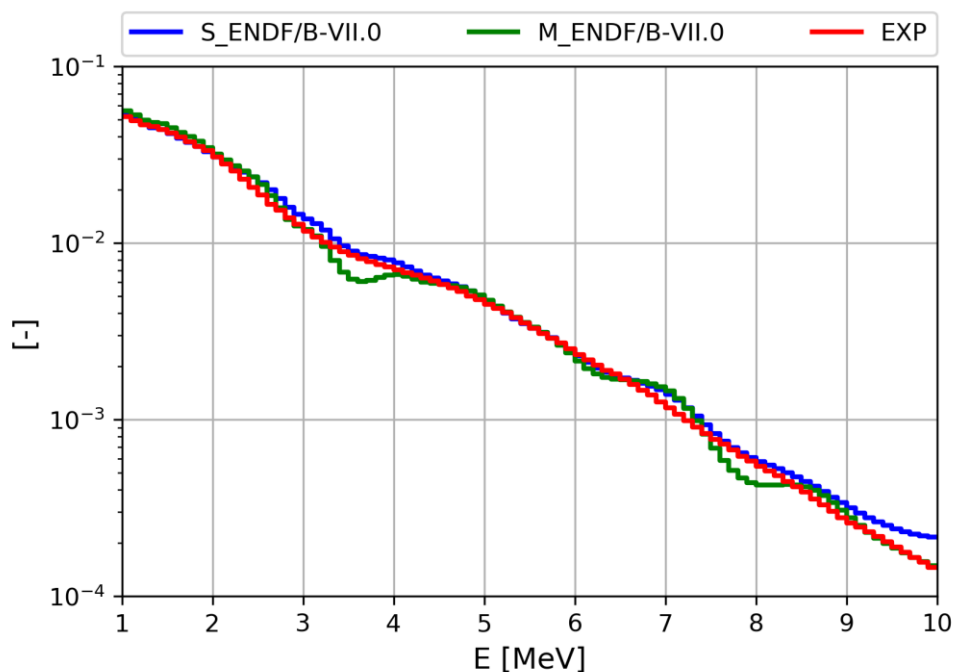
% --- obr --- plot <orientace> <pixely x> <pixely y>

plot 1 3000 3000 0 -20 20 -20 20

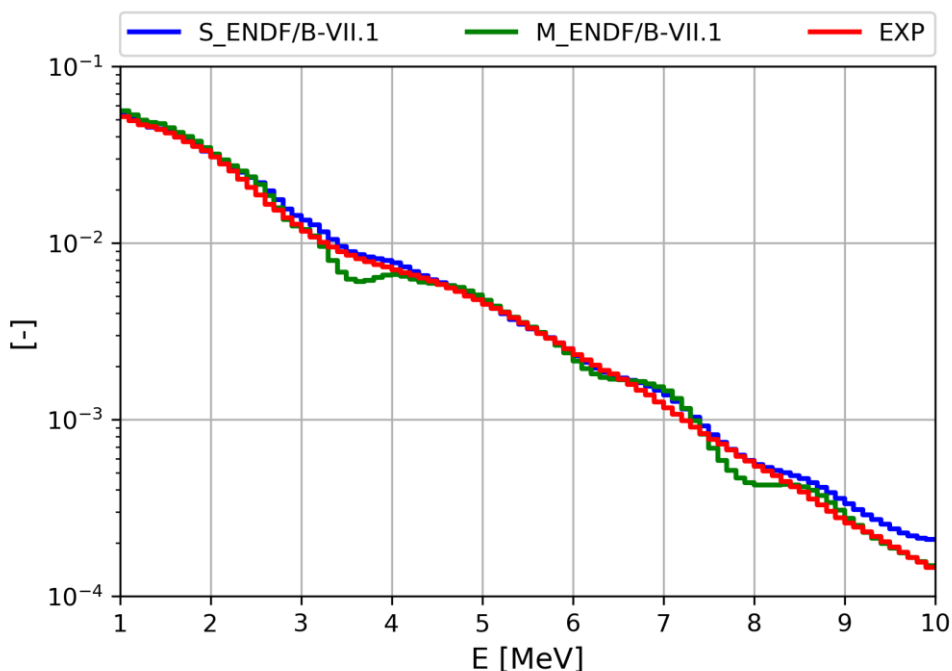
plot 2 15000 4000 0 -5 110 -20 20

plot 3 3000 3000 %8 -20 20 -20 20
```

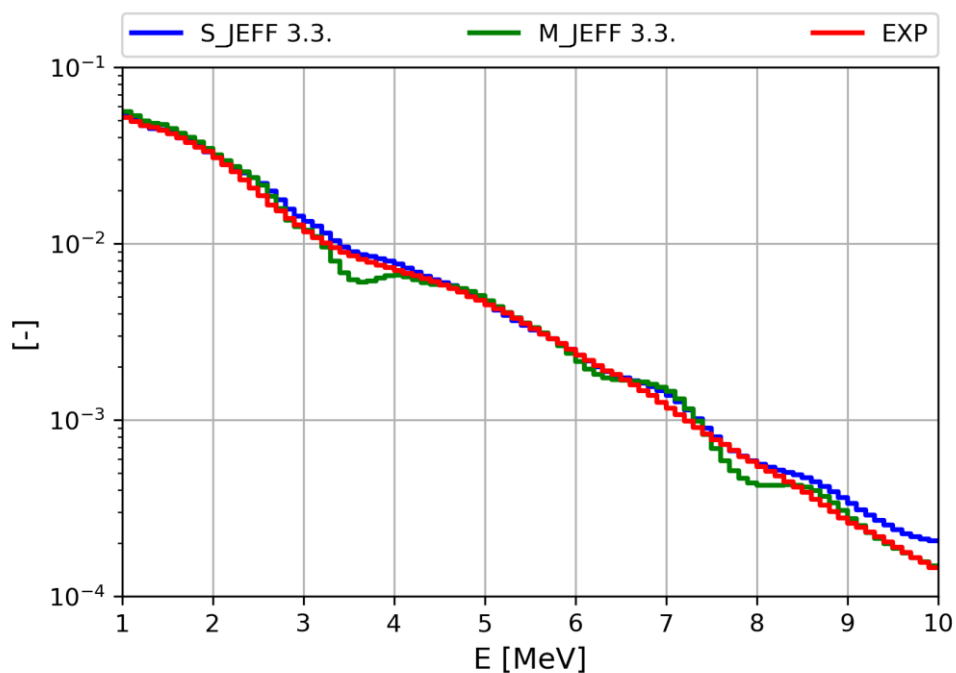
## B. Porovnání jednotlivých knihoven a experimentu v kódech MCNP 6.1 a Serpent 2.30.



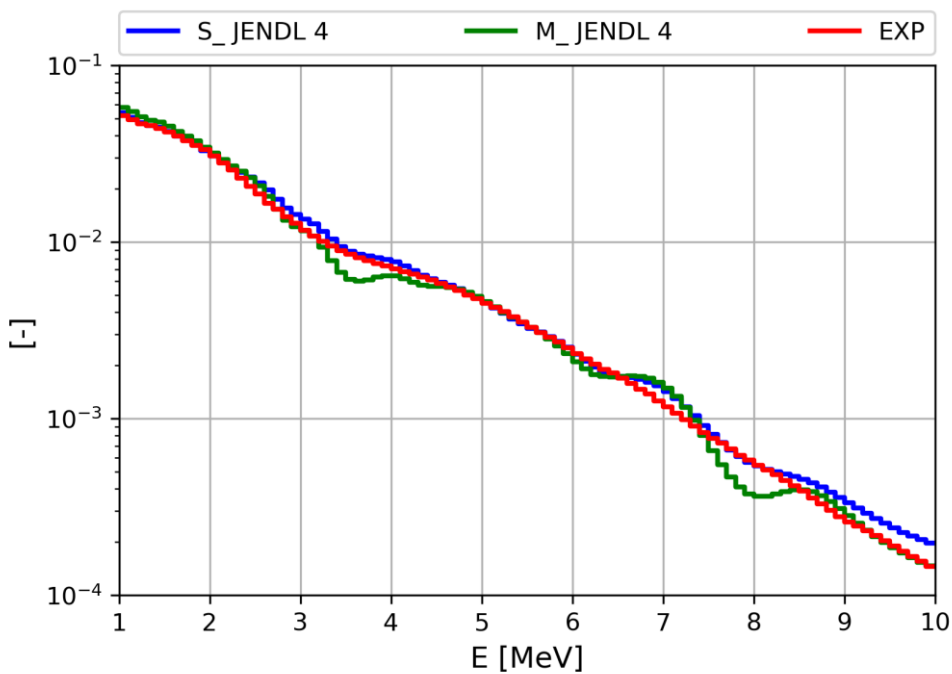
Graf 1. Porovnání experimentálních výsledků a výpočtů v knihovně ENDF/B-VII.0, M - MCNP 6.1., S - Serpent 2.30.



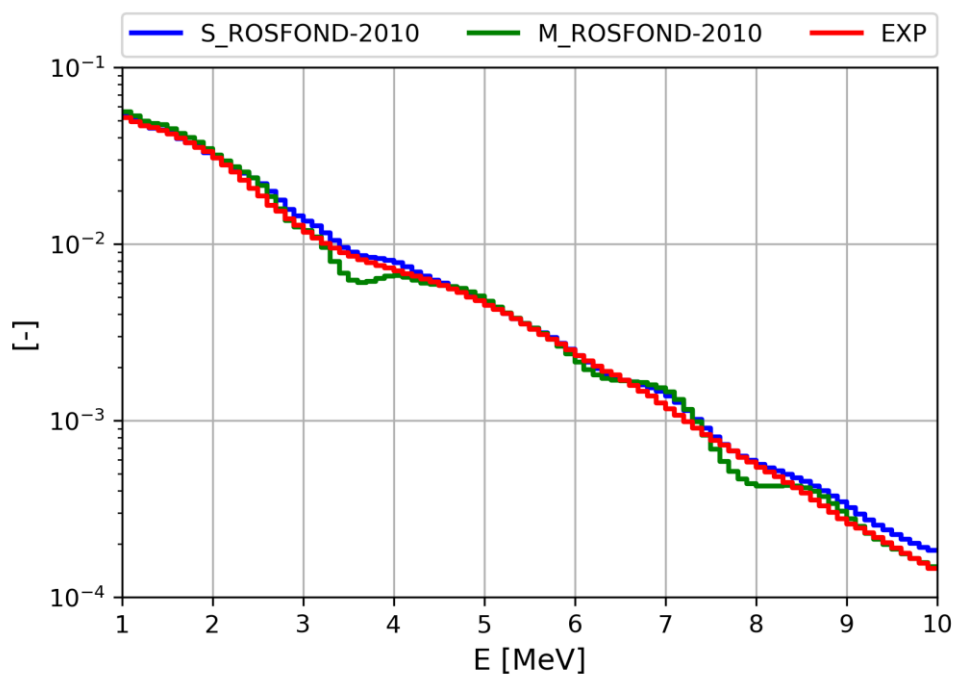
Graf 2. Porovnání experimentálních výsledků a výpočtů v knihovně ENDF/B-VII.1, M - MCNP 6.1., S - Serpent 2.30.



Graf 3. Porovnání experimentálních výsledků a výpočtů v knihovně JEFF 3.3.,  
M - MCNP 6.1., S - Serpent 2.30.



Graf 4. Porovnání experimentálních výsledků a výpočtů v knihovně JENDL 4.0.,  
M - MCNP 6.1., S - Serpent 2.30.



*Graf 5. Porovnání experimentálních výsledků a výpočtů v knihovně ROSFOND-2010, M - MCNP 6.1., S - Serpent 2.30.*