

---

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

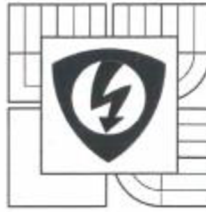
**DETEKTORY VÝKONU JADERNÉHO  
REAKTORU ZALOŽENÉ NA MĚŘENÍ JASU  
ČERENKOVOVA ZÁŘENÍ**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE  
AUTHOR**

**Bc. LUKÁŠ ČEJKA**

**BRNO 2015**



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ  
Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií  
Ústav elektroenergetiky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Elektroenergetika

**Student:** Bc. Lukáš Čejka  
**Ročník:** 2

**ID:** 136508  
**Akademický rok:** 2014/15

## NÁZEV TÉMATU:

### Detektory výkonu jaderného reaktoru založené na měření jasu Čerenkovova záření

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s využíváním Čerenkovova záření při měření v jaderné technice. Proveďte rešerši využití detekce Čerenkovova záření pro měření výkonu jaderných reaktorů.
2. Proveďte detailní analýzu dat naměřených na bazénu použitého paliva na Elektrárně Dukovany.
3. Proveďte měření vztahu výkonu a detekovaného jasu emitovaného Čerenkovova záření na výzkumném jaderném reaktoru a analyzujte výsledky.
4. Na základě výsledků navrhnete kalibraci přístroje na detekci změny výkonu jaderného reaktoru a navrhnete jeho použití v praxi jakožto nezávislého výkonového měření.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

1. Porges, K. et al.: Reactor power monitor based cherenkov radiation detection, IEEE Transactions on Nuclear Science NS17/1, 1970.
2. Chiladze, B. et al.: Application of Cherenkov effect to increase the safety of nuclear plants, Bulletin of the GNAS 6/2, 2012.
3. Arkani, M. et al.: Residual heat estimation by using Cherenkov radiation in Tehran Research Reactor, NIMA 596/3, 2008.

Další dle podle pokynů vedoucího a konzultantů práce.

**Termín zadání:** 9. 2. 2015

**Termín odevzdání:** 22.5.2015

**Vedoucí práce:** Ing. Karel Katovský, Ph.D.

**Konzultanti diplomové práce:** Ing. Michal Krbal, Ph.D.; Ing. Jan Varmuža



**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**

*předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.



---

Bibliografická citace práce:

ČEJKA, L. Detektory výkonu jaderného reaktoru založené na měření jasu Čerenkovova záření. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 57 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Katovský, Ph.D..

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....

---

### **Poděkování:**

Rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, Ing. Karlovi Katovskému, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady a podněty při vypracovávání této práce a experimentální části. Také děkuji panu Ing. Michalu Krbalovi, Ph.D a Ing. Janu Varmužovi za pomoc při realizaci experimentu, za poskytnuté materiály a rady. Experimentální část práce byla vykonána díky spolupráci s pracovištěm KJR FJFI a projektem OpenAccess reaktoru VR-1 a s pracovištěm Odboru reaktorové fyziky EDU ČEZ, a.s.. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat všem dalším lidem, kteří mi pomohli svými radami a podporou při vypracování a realizaci celé práce, hlavně mé přítelkyni Mgr. Haně Sloupenské a celé mé rodině.



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií**

**Ústav elektroenergetiky**

**Diplomová práce**

**Detektory výkonu jaderného  
reaktoru založené na měření jasu  
Čerenkovova záření**

**Bc. Lukáš Čejka**

**Vedoucí: Ing. Karel Katovský, Ph.D.**

**Konzultanti: Ing. Michal Krbal, Ph.D., Ing. Jan Varmuža**

**Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2015**

**Brno**



**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

**Faculty of Electrical Engineering and Communication  
Department of Electrical Power Engineering**

**Master's Thesis**

# **Nuclear reactor power detectors based on Cherenkov radiation measurement**

**by**

**Bc. Lukáš Čejka**

**Vedoucí: Ing. Karel Katovský, Ph.D.**

**Konzultanti: Ing. Michal Krbal, Ph.D., Ing. Jan Varmuža**

**Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2015**

**Brno**

## ABSTRAKT

Tato práce řeší vztah mezi jasným Čerenkovovým zářením v jaderném reaktoru a výkonem jaderného reaktoru. Čerenkovovo záření vzniká při průchodu nabitých částic hmotným prostředím, pokud je jejich rychlost vyšší než fázová rychlost světla v daném prostředí. V jaderných reaktorech moderovaných vodou vzniká díky vytržení elektronů z obalů působením gama záření. Měření je provedeno pomocí fotoaparátu a softwaru na fotometrické měření jasu. Dále je zde řešeno využití detekce Čerenkovova záření pro měření vyhoření použitého jaderného paliva. Jsou zde uvedeny příklady využití detekce Čerenkovova záření pro měření výkonu jaderných reaktorů, včetně analýzy naměřených výsledků na školním jaderném reaktoru VR-1. Naměřené výsledky ukazují, že při rostoucím výkonu roste i intenzita Čerenkovova záření, ovšem při prudkém snížení se objevuje zbytkové záření způsobené zpožděným gama zářením. Možné využití detekce jasu Čerenkovova záření je při monitorování nepředvídatelného zvýšení výkonu reaktoru či při kontrole použitého paliva.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** Čerenkovovo záření; výkon reaktoru; jaderné palivo

**ABSTRACT**

This work deals with the connection between the luminance of Cherenkov radiation in a nuclear reactor and his power. Cherenkov radiation arises when charged particle passing through the medium if their speed is higher than the phase velocity of light in that medium. In water moderated reactors, it is caused by secondary electrons produced by absorption of gamma rays. The measurement is done using the camera and software for photometric luminance measurements. Furthermore, there is mentioned the use of Cerenkov radiation detection to measure burnout of spent nuclear fuel. There are examples of usage of Cherenkov radiation detection to measure of nuclear reactors power, including an analysis of the measured results on research nuclear reactor VR -1. The measured results show increasing intensity of Cherenkov radiation with increasing reactor power, but residual detection response caused by delayed gamma radiation was observed after the rapid decrease of the reactor power. Possible use of detection luminance of Cherenkov radiation is in monitoring unforeseen increase in reactor power or in the control of used fuel.

**KEY WORDS:** Cherenkov radiation; reactor power; nuclear fuel



## OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK .....	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
1 ÚVOD.....	14
2 ČERENKOVOVO ZÁŘENÍ .....	15
2.1 HISTORIE OBJEVU ČERENKOVOVA ZÁŘENÍ .....	15
2.2 POPIS VZNIKU ČERENKOVOVA ZÁŘENÍ.....	17
2.3 VZNIK ČERENKOVOVA ZÁŘENÍ V JADERNÉM REAKTORU .....	20
2.3.1 INTENZITA ČERENKOVOVA ZÁŘENÍ V ZÁVISLOSTI NA VÝKONU REAKTORU.....	21
3 VYUŽITÍ ČERENKOVOVA ZÁŘENÍ PŘI MĚŘENÍ V JADERNÉ TECHNICE .....	22
3.1 REAKTOR MERLIN.....	22
3.2 VÝZKUMNÝ REAKTOR V TEHERÁNU .....	24
3.3 KONTROLA POUŽITÉHO PALIVA .....	27
3.3.1 ZBYTKOVÝ VÝKON JADERNÉHO PALIVA .....	27
3.3.2 DETEKTORY POUŽÍVANÉ IAEA .....	28
3.4 DETEKCE ČERENKOVOVA ZÁŘENÍ V ASTROFYZICE .....	28
4 DETEKTORY ČERENKOVOVA ZÁŘENÍ.....	30
4.1 DETEKTORY .....	30
4.1.1 DIGITÁLNÍ DETEKTOR ČERENKOVOVA ZÁŘENÍ .....	32
5 LUMIDISP.....	36
6 ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT V JADERNÉ ELEKTRÁRNĚ DUKOVANY .....	37
6.1 JADERNÁ ELEKTRÁRNA DUKOVANY.....	37
6.2 NAMĚŘENÁ DATA A ZPRACOVÁNÍ.....	38
6.3 SHRNUTÍ.....	41
7 MĚŘENÍ NA ŠKOLNÍM REAKTORU VR-1 .....	42
7.1 POPIS REAKTORU .....	42
7.2 POPIS MĚŘENÍ.....	43
7.3 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT .....	45
7.3.1 PRVNÍ MĚŘENÍ.....	45
7.3.2 DRUHÉ MĚŘENÍ.....	49
7.4 POUŽITÉ PŘÍSTROJE.....	51
7.5 ZÁVĚR MĚŘENÍ.....	52
7.6 NÁVRH NA INOVACI.....	52
8 ZÁVĚR.....	53
POUŽITÁ LITERATURA .....	54
PŘÍLOHA .....	57

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Maria Curie-Sklodowska [4].....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 2-2: Pavel Alexejevič Čerenkov [5].....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 2-3: Nákres prvního experimentu P.A. Čerenkova [1].....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 2-4: Konstrukce čela vlny podle Huygensova principu [8].....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 2-5: Spektrální charakteristika Čerenkovova záření pocházejícího z vyhořelého jaderného paliva. [15].....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 2-6: Štěpení jádra uranu <sup>235</sup>U [16].....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 2-7: Čerenkovovo záření v aktivní zóně jaderného reaktoru VR-1 v Praze .....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3-1: Čerenkovovo záření na jaderném reaktoru MERLIN [19] .....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3-2: A- Kalibrační křivka Čerenkovova detektoru, B- znázornění odezvy Čerenkovova detektoru [19].....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3-3: Nákres reaktoru s uspořádáním experimentu [20] .....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3-4: Umístění Čerenkovova detektoru v praxi [20].....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3-5: Odezva detektoru při zvyšování a snižování výkonu reaktoru. Výkon reaktoru je měřen pomocí kompenzované ionizační komory. [20].....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3-6: Snímání intenzity Čerenkovova záření pomocí kamery [21] .....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 3-7: Ukázka jednoho z detektorů observatoře Pierre Auger [29] .....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 3-8: Detektor Super-Kamiokande v Japonsku [30] .....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 4-1: Schematické znázornění detektoru RICH [11].....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 4-2: Princip fotonásobiče [11] .....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 4-3: CCD čip [12].....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 4-4: Popis DCVD [31].....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 4-5: CLS, Kalibrační zdroj UV světla [32].....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 4-6: Hloubka ponoření CLS do bazénu a jeho zobrazení na detektoru DCVD [32].....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 4-7: Intenzita záření kalibračního světelného UV zdroje CLS jako funkce vzdálenosti od DCVD [32] .....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 5-1: Ukázka LumiDISP sady a pracovního prostředí programu [15].....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 6-1: Pohled na zavážecí stroj, který se nachází nad bazénem vyhořelého paliva, a na přípravu měření. JE Dukovany. ....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 6-2: Schéma uspořádání bazénu s vyhořelým palivem s vyznačenými měřenými oblastmi. .</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 6-3: Jasová mapa bazénu vyhořelého paliva EDU. Měřená oblast jasu je kruh o průměru 20 pixelů. ....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 6-4: Grafické zpracování měřené oblasti bazénu se zaznačenými naměřenými hodnotami .</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 6-5: Střední hodnota jasu v závislosti na vyhoření jaderného paliva.....</i>	<i>40</i>

---

<i>Obr. 7-1: Řez školním reaktorem VR-1[14]</i> .....	42
<i>Obr. 7-2: Pohled na hradidlo mezi bazény reaktoru VR-1</i> .....	43
<i>Obr. 7-3: Příprava experimentu na školním reaktoru VR-1</i> .....	44
<i>Obr. 7-4: Uspořádání aktivní zóny reaktoru VR-1 při měření</i> .....	45
<i>Obr. 7-5: Záznam změn výkonu během celého měření</i> .....	46
<i>Obr. 7-6: Snímek Čerenkovova záření v aktivní zóně jaderného reaktoru VR-1</i> .....	46
<i>Obr. 7-7: Snímek Čerenkovova záření v aktivní zóně jaderného reaktoru VR-1 pořízený se speciálním filtrem.</i> .....	47
<i>Obr. 7-8: Zobrazení aktivní zóny v programu LumiDISP s rozložením jasu, a se zvýrazněnou oblastí měření jasu.</i> .....	47
<i>Obr. 7-9: Závislost střední hodnoty jasu v označené oblasti na výkonu</i> .....	48
<i>Obr. 7-10: Střední hodnoty jasu ve vyznačené oblasti při měření bez filtru. Měřeno od okamžiku odstavení až po mez měřitelnosti. Při ISO 100 (0s-143s) a ISO 2000 (159s-409s). Pro porovnání je zde vyznačen pokles výkonu v onom čase. (Oranžová barva, svislá osa vpravo)</i> .....	50
<i>Obr. 7-11: Detailnější pohled na pokles střední hodnoty jasu Čerenkovova záření ve vyznačené oblasti při měření bez filtru od okamžiku odstavení reaktoru po 143s měření při ISO 100 ..</i> 50	
<i>Obr. 7-12: Detailnější pohled na pokles střední hodnoty jasu Čerenkovova záření ve vyznačené oblasti při měření bez filtru od okamžiku 159s až po mez měřitelnosti, měření při ISO 2000</i> .....	51
<i>Obr. 7-13: Použitý zrcadlový fotoaparát Nikon D7000 [34]</i> .....	51

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 2-1: Prahové energie v elektronvoltech pro proton a elektron nacházejících se v různém prostředí .....</i>	<i>19</i>
<i>Tab. 6-1: Vybrané hodnoty palivových kazet se stejným obohacením a stejnou dobou chlazení ..</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 7-1: Poloha regulačních tyčí před začátkem měření .....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 7-2: Tabulka naměřených středních hodnot jasu v závislosti na rostoucím výkonu jaderného reaktoru. Nejistota měření je asi 10%, vychází z dílčích nejistot, jako je teplotní šum čipu, spektrální přizpůsobení snímače, vliv mechanických součástí fotoaparátu .....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 7-3: Tabulka naměřených hodnot střední hodnoty jasu Čerenkovova záření při odstavení reaktoru při snímání s hodnotami ISO 100 a ISO 2000. Nejistota měření je asi 10%. .....</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 0-1 Tabulka získaných hodnoty z měření na EDU 2014. Hodnoty jsou řazeny podle obohacení a podle vyhoření paliva, ke každému měřenému palivovému souboru je přiřazen jas. ....</i>	<i>57</i>

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Veličina	Značka jednotky
$E_{1f}$	energie uvolněná při jednom štěpení	J
$E_c$	celková energie	J
$E_k$	klidová energie	J
$E_{klid}$	kinetická energie	J
$E_p$	prahová energie	J
$N$	počet elementárních entit	1
$P$	výkon	W
$Q$	elektrický náboj	C
$V_f$	objem štěpného materiálu	m <sup>3</sup>
$c$	rychlost světla ve vakuu	m.s <sup>-1</sup>
$f$	frekvence	Hz
$m_0$	klidová hmotnost	kg
$n$	index lomu	1
$r$	vzdálenost	m
$t$	čas	s
$v$	rychlost částice	m.s <sup>-1</sup>
$v_{min}$	minimální rychlost částice	m.s <sup>-1</sup>
$\theta$	úhel mezi směrem letu částice a dráhou emitovaného fotonu	°
$\theta_{max}$	maximální úhel mezi směrem letu částice a dráhou emitovaného fotonu	°
$\Sigma_f$	makroskopický účinný průřez	m <sup>-1</sup>
$\Phi$	světelný tok z referenčního zdroje	lm
$\Phi_B$	naměřený světelný tok	lm
$\varphi^{stř}$	střední hustota neutronového toku	m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>

**Zkratka****Popis**

CCD	Charged-Coupled Device
CLS	Calibration Light Source
CVD	Cherenkov Viewing Device
DCVD	Digital Cherenkov Viewing Device
EMCCD	Electron-Multiplied Charged-Coupled Device
IAEA	International Atomic Energy Agency
ISO	Citlivost
LumiDISP	Luminance Distribution Processing
MERLIN	Medium Energy Research Light Water Moderated Industrial Nuclear Reactor
RICH	Ring Imaging Cherenkov Detector
UV	Ultrafialové Záření
VVER	Vodou Chlazený, Vodou Moderovaný Energetický Reaktor

# 1 ÚVOD

Vývoj jaderné energetiky přináší i nové otázky ohledně bezpečnosti provozu a skladování vyhořelého paliva. Na bezpečnost jaderných zařízení jsou kladeny stále vyšší požadavky. Hledají se nové nezávislé způsoby, jak kontrolovat stav vyhořelého paliva, případně jaká další bezpečnostní opatření zavést pro zamezení jaderných havárií. Zde mohou najít uplatnění detektory Čerenkovova záření, které je teoreticky možné využít jako nezávislé bezpečnostní systémy pro odstavení jaderného reaktoru, nebo například pro měření vyhoření použitého jaderného paliva.

Čerenkovovo záření vzniká při přímočarém pohybu nabitě částice hmotným prostředím, když se částice pohybuje vyšší rychlostí, než je rychlost světla v daném prostředí, což záleží na indexu lomu. Čerenkovovo záření se potom projevuje namodralým světelným zářením. Ovšem nejvýrazněji se Čerenkovovo záření projevuje v ultrafialové oblasti spektra záření. Se zvyšující se vlnovou délkou jeho intenzita klesá.

Doposud detekce Čerenkovova záření nacházela uplatnění převážně v oblasti astrofyziky, kde je detekováno kosmické záření a vědci tak mohou získat mnoho informací o vesmírných procesech. V jaderné oblasti je možné využít toto záření ke stanovení výkonu jaderného reaktoru případně stanovení vyhoření jaderného paliva. Záření je zde způsobeno především elektrony pocházejícími z obalu atomů, které působením gama záření vznikajícím při štěpných reakcích, opustí obal atomu. Vzhledem k tomu, že při nárůstu výkonu reaktoru roste i počet štěpných reakcí, tak lze uvažovat nad využitím detekce Čerenkovova záření jako ukazatele výkonu jaderného reaktoru.

Cílem práce je seznámit se s využíváním Čerenkovova záření při měření v jaderné oblasti. V několika kapitolách je možné detailněji se seznámit s Čerenkovovým zářením, s historií jeho objevu a následně principem jeho vzniku. Jsou zde též uvedeny možnosti detekce tohoto záření a jeho využití jaderné oblasti včetně měření kosmického záření. Dále je v diplomové práci provedena analýza naměřených dat z bazénu použitého paliva v jaderné elektrárně Dukovany. Zde jsou zanalyzovány pořízené fotografie s přiřazenou střední hodnotou jasu ke každému palivovému souboru. Cílem měření bylo zjistit závislost mezi vyhořením paliva a onou střední hodnotou jasu. Námětem pro toto měření bylo využití fotoaparátu a programu LumiDISP, který byl vyvinut na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně, pro možnost přítomnosti použitého paliva a kontroly jeho stavu. Součástí práce je i samotné měření závislosti výkonu jaderného reaktoru na měřené hodnotě jasu Čerenkovova záření. Měření proběhlo na školním reaktoru VR-1, a bylo též provedeno pomocí digitálního zrcadlového fotoaparátu, kterým byly pořizovány jednotlivé snímky při předem nastavených hodnotách výkonu jaderného reaktoru. Při následném zpracování naměřených hodnot byla provedena detailní analýza, která potvrdila lineární závislost intenzity Čerenkovova záření a rostoucího výkonu jaderného reaktoru. Na základě naměřených výsledků byla navržena určitá doporučení, která by mohla přispět k lepším výsledkům měření.



## 2 ČERENKOVOVO ZÁŘENÍ

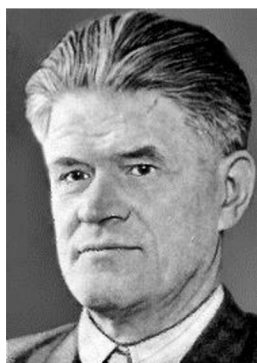
### 2.1 Historie objevu Čerenkovova záření

Čerenkovovo záření bylo patrně zaznamenáno již přelomu 19. a 20. století. Například Angličan Oliver Heaviside uvažoval nad částicemi pohybujícími se rychleji než světlo v daném prostředí a předpokládal, že částice budou charakterizovány určitým druhem záření. Ono záření nejspíše zaznamenala i Marie Curie-Sklodowska se svým manželem Pierrem v roztocích s vysokou aktivitou radia. Ovšem oba byli zabráni do izolace radia z roztoků, a tak nevěnovali namodralému záření příliš velkou pozornost. Studium tohoto záření se začal více věnovat až Francouz Lucien Mallet. V roce 1926 zjistil, že světlo vyzařované průhlednými látkami, které jsou v blízkosti radioaktivního zdroje má spojité spektrum, a nemá tedy původ v luminiscenci, jenž má diskrétní spektrum. Dále se studiem Čerenkovova záření Mallet nezabýval a tak byla jeho práce zapomenuta. [1]



*Obr. 2-1 Maria Curie-Sklodowska [4]*

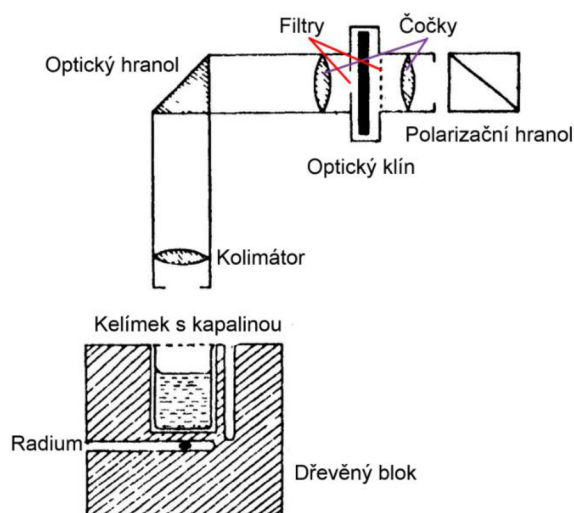
Mezi Malletovým studiem a dalším zkoumáním záření uplynulo několik let. Tato odmlka byla nejspíše způsobena velkým zájmem vědců o fluorescenci, ultrafialové záření a v neposlední řadě o radioaktivní záření, a také nedostatkem citlivých detektorů Čerenkovova záření. V 1934 se tomuto tématu začal věnovat Pavel Alexejevič Čerenkov, po němž je záření pojmenováno. [2]



*Obr. 2-2: Pavel Alexejevič Čerenkov [5]*

Čerenkov zjistil, že se jedná o velmi slabé světelné záření spadající do ultrafialové a modré viditelné oblasti spektra, vyznačující se výraznou směrovostí vzhledem k dráze částice, která jej způsobila. Čerenkov se původně, i navzdory Malletovu zjištění, mylně domníval, že se jedná o luminiscenci, a provedl prvotní experimenty, které byly založeny na vizuálním pozorování. První experiment byl realizován velmi jednoduše, bylo k němu použito 104 mg radia v malé ampulce.

Radium bylo uloženo v dřevěném bloku, kde se též nacházel platinový kelímek se zkoumanou kapalinou. Nad kelímkem se nachází optický systém složený z kolimátoru (z různoběžných paprsků záření vytváří úzký rovnoběžný svazek), optického klínu, dvou čoček, barevných filtrů a polarizačního hranolu. V kelímku bylo postupně vystřídáno až 16 průhledných kapalin, od destilované vody, přes toluen, až po různé druhy alkoholu. Čerenkov tedy z prvního pokusu zjistil, že rozsah relativních intenzit záření, měřených pomocí optického klínu, při změně kapalin, byl velmi malý. Spektrální distribuce u různých kapalin se též měnila velmi málo a záření bylo modré až fialové. Dále zkoušel kapalinu ohřívat, změnou teploty se vlastnosti záření neměnily, též do kapalin přidával například dusičnan stříbrný, který u fluorescence, stejně jako změna teploty, snižuje intenzitu záření. Intenzita záření se ovšem neměnila, to tedy znamenalo, že o fluorescenci nemůže být řeč. Dalšími experimenty bylo prokázáno, že toto nové záření je vyvoláno rychlými elektrony, které vznikají při srážkách kvant gama záření, pocházejících z rozpadů jader, s atomy dielektrického prostředí, nebo s elektrony, které vznikají přímo z radioaktivního rozpadu jader. V roce 1937 sepsali vysvětlení vzniku nového záření v rámci klasické elektrodynamiky pánové Ilja M. Frank a Igor J. Tamm. [1] [3]



Obr. 2-3: Náčrt prvního experimentu P.A. Čerenkova [1]

Zřejmě důsledkem 2. světové války bylo další zkoumání Čerenkovova záření, kromě vytvoření kvantová teorie onoho záření V. Ginsburgem, opožděno. Další posun ve výzkumu způsobil objev fotonásobiče, což je citlivý detektor, který je schopen zachytit velmi slabé optické signály.

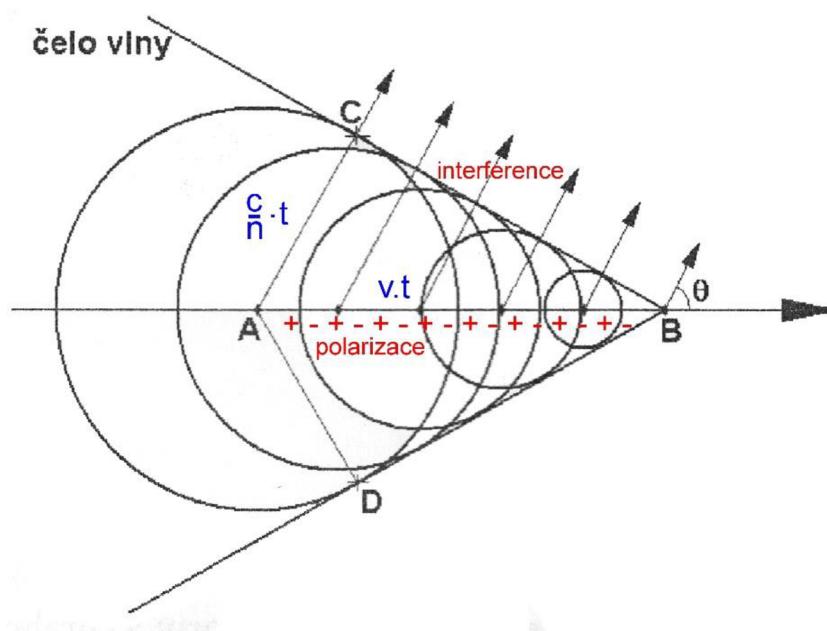
První opravdu praktický detektor Čerenkovova záření byl sestaven v roce 1950 britským fyzikem J. V. Jellee. V dalších letech pak stoupal zájem o detekci záření ve spojení s praktickými aplikacemi v oblasti experimentální jaderné fyziky, v oblasti kosmického záření a ve fyzice elementárních částic. Čerenkovovým detektorem byl objeven antiproton. Díky tomuto záření bylo možné změnit tradiční představy, že ve velkých hloubkách moří, kam nepronikne sluneční záření, je úplná tma. Vzhledem k přítomnosti radioaktivního draslíku  $^{40}\text{K}$  musí voda díky Čerenkovově efektu slabě svítit. Tento závěr podporuje myšlenku, že i hlubinní živočichové vidí, a vysvětluje velké rozměry jejich očí.

V roce 1958, už po Vavilově smrti, obdrželi P.A. Čerenkov, I. M. Frank a I. J. Tamm Nobelovu cenu za fyziku v souvislosti s objevem a popsáním Čerenkovova záření. [2] [3]

## 2.2 Popis vzniku Čerenkovova záření

Čerenkovovo záření má elektromagnetický původu, a vzniká při průchodu nabitých částic látkou, pokud je jejich rychlost vyšší než fázová rychlost světla v daném prostředí. Úhel mezi svazkem procházejících částic a směrem emise závisí na rychlosti částic záření.

Pokud se elektricky nabitá částice pohybuje rovnoměrně přímočaře v látkovém prostředí, dochází vlivem elektrického pole částice k polarizaci atomů a molekul v okolí nabitě částice. Vznikají elektrické dipóly. Po průchodu částice se atomy prostředí opět depolarizují a získaná energie je vyzářena ve formě elektromagnetického vlnění. Pohybuje-li se částice relativně pomalu, tak vzniklé elektromagnetické vlnění podléhá interferenci, vzájemně se vzniklé vlny podél dráhy částice vyruší, a dojde k pružnému předání energie zpět částici. Ovšem pokud se částice pohybuje rychleji než fázová rychlost světla v daném prostředí, tak při vyzáření elektromagnetické vlny při depolarizaci se částice už nachází dále na své dráze a vzniklé vlny jsou vzájemně ve fázi. Dochází tak k interferenčnímu zesilování a vzniku koherentního světla.



Obr. 2-4: Konstrukce čela vlny podle Huygensova principu [8]

Na obrázku 2-4 je pro lepší názornost zobrazena konstrukce čela vlny podle Huygensova principu. U této konstrukce je nutný předpoklad toho, že rychlost částice se na dráze z bodu A do bodu B nemění. Vzdálenost z bodu A do bodu B částice překoná za čas  $t$ , za stejný čas urazí čelo vlny vzniklé v bodě A vzdálenost  $AC = AD$ . Přímky  $CB$  a  $DB$  tvoří čelo vlny, čelo vlny má tvar pláště kužele.

Úhel  $\theta$  se nachází mezi směrem letu částice a dráhou emitovaného fotonu, lze určit následující rovnicí

$$\cos \theta = \frac{c}{v \cdot n} . \quad (2.1)$$

Kde  $c$  je rychlost světla ve vakuu  $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $v$  je rychlost částice a  $t$  je čas za který překoná částice vzdálenost  $AB$ . Lze tedy říci, že měření úhlu  $\theta$  můžeme stanovit energie respektive rychlost

částice. Rychlost částice, při které vzniká Čerenkovovo záření, se nazývá minimální prahová rychlost, a závisí pouze na indexu lomu prostředí  $n$ , ve kterém se částice pohybuje.

$$v_{\min} = \frac{c}{n} \quad (2.2)$$

Podle rovnice 2.1 odpovídá minimální prahové rychlosti úhel  $\theta = 0^\circ$ , takže záření má směr dráhy částice. Naopak u částic, které mají rychlost blízkou se rychlosti světla v daném prostředí, úhel  $\theta$  nabývá maximálních hodnot

$$\theta_{\max} = \arccos \frac{1}{n}. \quad (2.3)$$

Ke vzniku Čerenkovova záření tedy dochází při rychlosti  $v$ , která se nachází v intervalu

$$\frac{c}{n} \leq v \leq c. \quad (2.4)$$

Odpovídající minimální prahová energie, kterou musí částice mít, aby vzniklo Čerenkovovo záření, může být určena pomocí vztahů:

$$E_k = E_c - E_{klid}, \quad (2.5)$$

$E_c$  je celková energie, je klidová energie a  $E_k$  je energie kinetická.

$$E_c = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (2.6)$$

$$E_{klid} = m_0 \cdot c^2, \quad (2.7)$$

kde  $m_0$  je klidová hmotnost. Klidovou hmotnost mají částice, které se pohybují rychlostí světla a jejich relativní hmotnost je dána velikostí energie, kterou přenáší a je přímo úměrná frekvenci.

Protože rychlost částice je dána vztahem

$$v = \frac{c}{n}, \quad (2.8)$$

tak po úpravách je kinetická energie, resp. prahová energie dána vztahem

$$E_k = E_{prah} = m_0 \cdot c^2 \cdot \left( \sqrt{\frac{n^2}{n^2 - 1}} - 1 \right). \quad (2.9)$$

V následující tabulce jsou zobrazeny prahové energie pro různá prostředí a částice za normálního atmosférického tlaku.

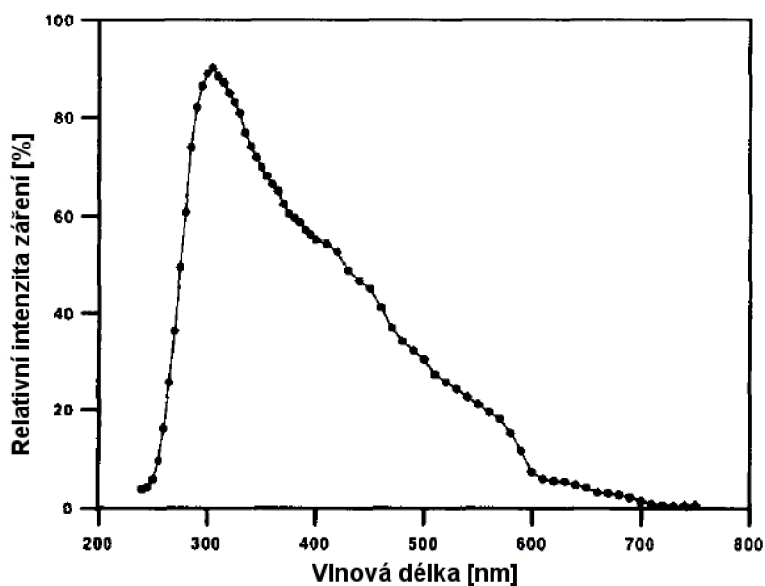
Tab. 2-1: Prahové energie v elektronvoltech pro proton a elektron nacházejících se v různém prostředí [9]

Prostředí	Proton p+	Elektron e-
Vzduch (n=1,0003)	37431 MeV	20,35 MeV
Voda (n=1,3)	486 MeV	0,26 MeV
Sklo (n=1,5)	321 MeV	0,173 MeV

Záření se vyskytuje především ve viditelné oblasti spektra, kde platí, že  $n > 1$ . Vlnová délka záření  $\lambda$  musí být ve srovnání s délkou dráhy  $l$ , kterou urazila částice v daném prostředí, menší. Kdyby tomu tak nebylo, tak mohou nastat difrakční jevy, a světlo se nebude šířit pouze pod jedním koherentním úhlem. Dále musí být rychlost částice v prostředí konstantní, lépe řečeno, časy ve dvou po sobě jdoucích vzdálenostech drah musí být menší než perioda emitované vlny.

Čerenkovovo záření nevzniká jen u elektronů, ale jak je patrné z tabulky 2-1, tak lze ono záření pozorovat i protonů, dále u atomových jader a dalších nabitých částic, také neutrony při rychlosti převyšující rychlost světla mohou způsobit vznik Čerenkovova záření, protože mají nenulový magnetický moment.

Intenzita Čerenkovova záření roste s indexem lomu  $n$  daného látkového prostředí, má spojité spektrum, a je stejné pro částice se stejným nábojem. Čím kratší vlnové délky jsou (vyšší frekvence), tak tím více roste relativní intenzita záření. Proto má záření modrou barvu, část leží v ultrafialové oblasti. Maximum spektra leží přibližně kolem hodnoty 330 nm.



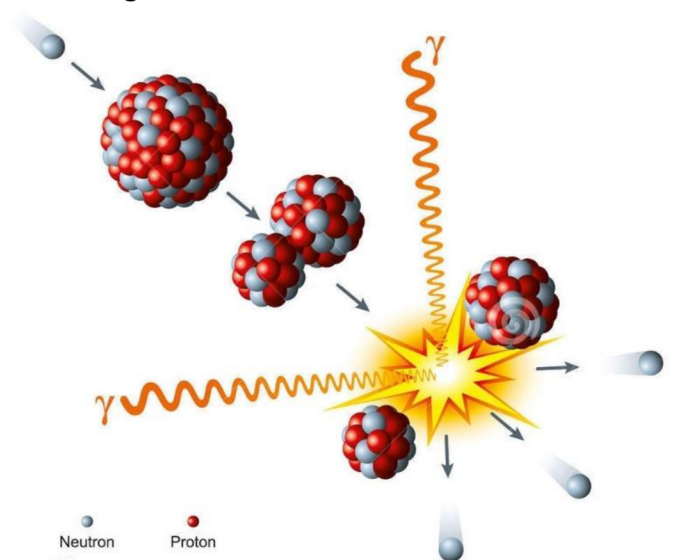
Obr. 2-5: Spektrální charakteristika Čerenkovova záření pocházejícího z vyhořelého jaderného paliva. [15]

Závěrem lze tedy říci, že prolétá-li částice konstantní rychlostí po přímé dráze daným prostředím rychlostí vyšší než je fázová rychlost světla v tomto prostředí, jenž je dána indexem lomu onoho prostředí, dochází ke vzniku elektromagnetické rázové vlny, jejíž čelo má tvar pláště kužele, při níž vzniká viditelné světlo. Elektromagnetické rázové vlny lze přirovnat k akustickým rázovým vlnám, které vznikají při průletu tělesa vzduchem nadzvukovou rychlostí. [6, 7, 8]

### 2.3 Vznik Čerenkovova záření v jaderném reaktoru

Čerenkovovo záření můžeme nalézt i v jaderných reaktorech. Ovšem tyto reaktory musejí být moderovány vodou. Díky čistému a průzračnému vodnímu sloupci, ve kterém se nachází aktivní zóna, můžeme pozorovat modře se projevující Čerenkovovo záření.

Všeobecně jaderné reakce spočívají v ostřelování terčíkového jádra určitou částicí, která vyvolá změnu jádra a dojde k vyzáření nové částice. Vztáhneme-li toto tvrzení na procesy v jaderném reaktoru, tak  $^{235}\text{U}$  je zasažen pomalým neutronem. Vzniklé vybuzené jádro  $^{236}\text{U}$  je vysoce nestabilní a rozštěpí se na dva středně těžké fragmenty. Při tomto procesu jsou emitovány dva až tři neutrony. Aby byla zachována energetická bilance, je nutné připomenout, že při štěpení je uvolněna i energie, která zahrnuje i záření gama. Využijeme-li k popisu štěpení kapkový model Nielse Bohra, tak se tvar jádra zasaženého uranu deformuje na eliptický, kvůli tomu, že se na obou jeho stranách formují odpuzující se protony. Díky odpudivé elektrické síle protonů je překonána vazbová energie a jádro se rozdělí na dva fragmenty, které se od sebe rozletí a uvolní jeden, někdy dva okamžité neutrony, kterých je zhruba 99 %. Zároveň je při tomto rozdělení vysláno záření gama. Jedná se o okamžité záření, protože vzniká při štěpení. Záření gama, stejně jako zpožděné neutrony, vzniká i následně při přeměnách produktů štěpení. I přes uvolnění okamžitého neutronu mají štěpné produkty velký poměr počtu neutronů k protonům a jsou nestabilní, radioaktivní a emitují záporné beta částice s gama zářením.



Obr. 2-6: Štěpení jádra uranu  $^{235}\text{U}$  [16]

Čerenkovovo záření v jaderných reaktorech vzniká převážně z Comptonova rozptylu. To znamená, že gama záření předá svou energii atomům nebo jejich elektronům, jenž jsou schopny překonat rychlost světla v závislosti na indexu lomu daného prostředí, a změni svoji vlnovou délku. Částečně ke vzniku Čerenkovova záření přispívá vnější fotoelektrický jev, při němž jsou elektrony uvolňovány z látky v důsledku absorpce elektromagnetického záření.

Jak už bylo výše zmíněno, gama záření může být okamžité nebo zpožděné. Pokud je štěpná reakce v reaktoru zastavena, Čerenkovovo záření vzniká už jen pouze ze zpožděného gama záření. Možnost vzniku Čerenkovova záření z elektronů pocházejících z beta rozpadu štěpných produktů je nulová, protože vyzářené elektrony jsou zpomaleny už v palivu a nemají tak dostatečnou energii pro překonání rychlosti světla v daném prostředí. [7]

Vzhledem k tomu, že aktivní zóna reaktoru není bodový zdroj, lze těžko určit úhel mezi směrem letu elektronu a dráhou emitovaného fotonu. Tudíž nelze přesně určit energii elektronu. Ovšem použijeme-li rovnici 2.3 v kapitole 2.2 Popis Čerenkovova záření, tak při uvažování indexu lomu vody  $n = 1,3$ , viz. Tab. 2-1, se tento úhel  $\theta$  pohybuje od  $0^\circ$  do přibližně  $40^\circ$ .



Bližší zkoumání Čerenkovova záření vyvolalo otázku, zda-li je možné využít detekci onoho záření k nezávislému měření výkonu jaderného reaktoru. V současné době jsou používány ionizační komory k získání informace o hustotě toku neutronů, který je přímo úměrný výkonu reaktoru.

$$P = \varphi^{stř} \cdot \Sigma_f \cdot V_f \cdot E_{1f} . \quad (2.10)$$

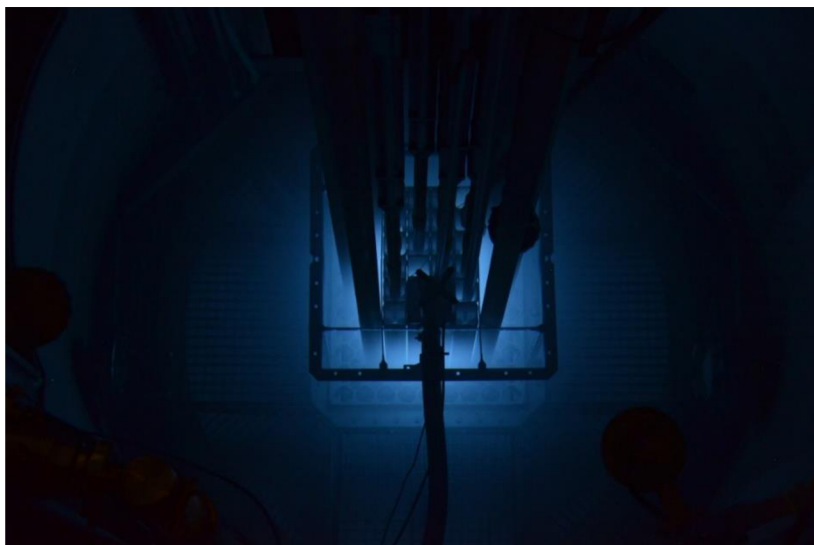
Kde  $P$  je výkon reaktoru,  $\varphi^{stř}$  je Střední hodnota hustoty neutronového toku,  $\Sigma_f$  je makroskopický účinný průřez pro štěpení,  $V_f$  je celkový objem štěpitelného materiálu a  $E_{1f}$  je energie uvolněná při jednom štěpení.

Ovšem ionizační komory nejsou umístěny přímo nad aktivní zónou a měří spíše únik neutronů místo aktivní zónu. Při teoretickém použití detektorů Čerenkovova záření nastává problém při nízkých výkonech reaktoru nebo při rychlém odstavení reaktoru, kdy ještě určitý čas po odstavení reaktoru je možné pozorovat gama záření ze štěpných produktů. Proto by se výsledky měření z Čerenkovova detektoru mohly závažně lišit od skutečného výkonu reaktoru. Detektor by nebyl schopen reagovat pružně na změny výkonu reaktoru kvůli přeměně vzniklých štěpných produktů. [13]

Detektory by však bylo možné využít například k mapování toku gama záření, případně jako nezávislý bezpečnostní systém při nečekaném nárůstu výkonu reaktoru. Nabízí se i využití při kontrolách vyhořelého paliva v bazénech.

### 2.3.1 Intenzita Čerenkovova záření v závislosti na výkonu reaktoru

Obecně lze říci, že s rostoucím výkonem jaderného reaktoru roste i intenzita Čerenkovova záření. Zvedá-li se výkon jaderného reaktoru, roste počet štěpení a tím i intenzita gama záření což způsobí větší počet elektronů s energií potřebnou pro překonání rychlosti světla v daném látkovém prostředí.



Obr. 2-7: Čerenkovovo záření v aktivní zóně jaderného reaktoru VR-1 v Praze

Avšak intenzita gama záření není jednoduše spojená s výkonem jaderného reaktoru, například po odstavení jaderného reaktoru by zbytkové gama záření ze štěpných produktů mohlo zapříčinit opomenutí rychlého nárůstu neutronů.

### 3 VYUŽITÍ ČERENKOVOVA ZÁŘENÍ PŘI MĚŘENÍ V JADERNÉ TECHNICE

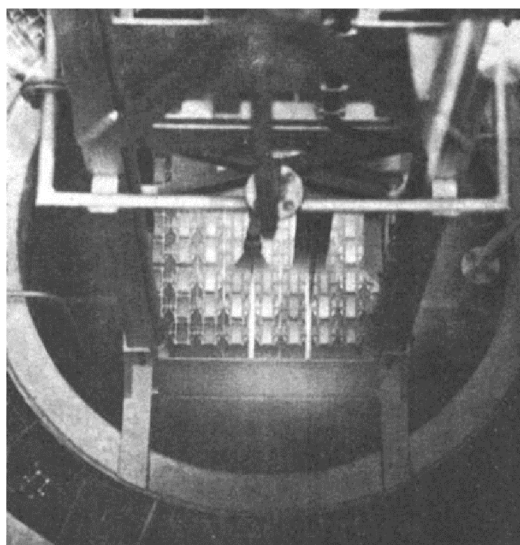
První zdokumentovaná měření závislosti Čerenkovova záření na výkonu jaderného reaktoru pochází už ze šedesátých a sedmdesátých let minulého století. Detektory Čerenkovova záření lze umístit mimo aktivní zónu, tudíž jsou snáze dostupné údržbě. Nemusejí být vystaveny radioaktivnímu záření. Princip takovýchto detektorů je jednoduchý. Skládají se v podstatě z optické soustavy, která přivede záření na detektor, kterým může být fotonásobič. Začátkem sedmdesátých let vědci zkoumali možnost vzniku Čerenkovova záření v plynech. Pro plyny platí, že index lomu je unikátní funkcí hustoty. Experimenty se vznikem záření v plynech byly prováděny s různými plyny a jejich tlaky. Při měření s metanem a etanem bylo zjištěno, že s rostoucím tlakem roste intenzita záření. [17]

Současné Čerenkovovy detektory, které jsou experimentálně užívané v jaderné technice pro měření intenzity záření v závislosti na výkonu reaktoru, využívají optická vlákna, která jsou schopná přenést záření z měřené oblasti k detekčnímu zařízení (fotonásobič, fotodioda).

V souvislosti se zvýšením bezpečnosti jaderných elektráren se vědci z High Energy Physics Institute of I. Javakhishvili Tbilisi State University zaměřili na využití detekce Čerenkovova záření, jako potencionálního bezpečnostního systému elektrárny. Detektor Čerenkovova záření by mohl být samostatný nezávislý systém, který by měřil výkon jaderného reaktoru, případně kontroloval a měřil vyhořelé palivo. Pro měření využili optické vlákno a fotonásobič. Měřili ultrafialovou složku Čerenkovova záření. Záření z jaderného zdroje nahradili pomocí ultrafialové LED, která byla porovnávána s jaderným zdrojem. [18]

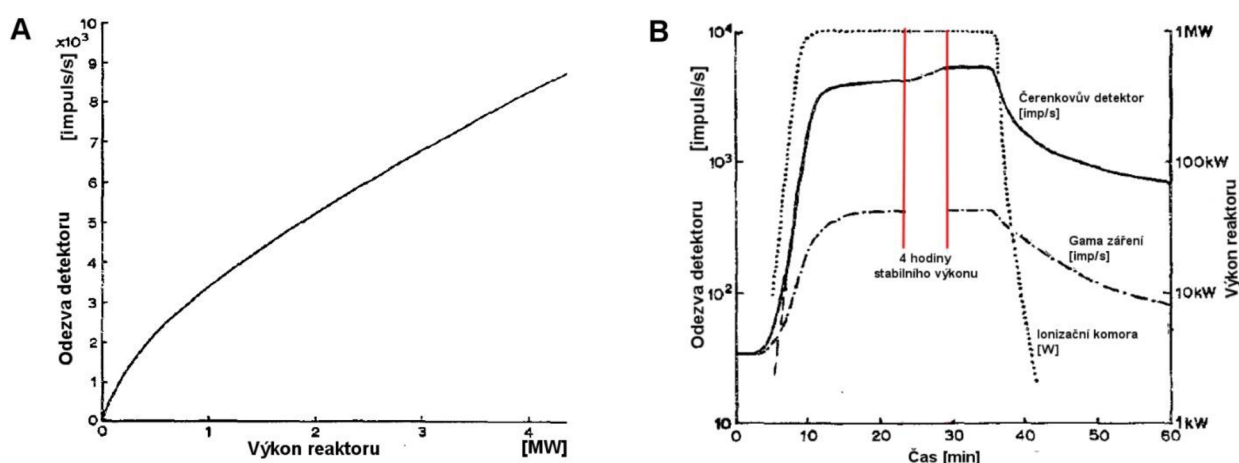
#### 3.1 Reaktor Merlin

V roce 1962 vznikla studie v AEI Research Laboratory, Aldermaston Court, Aldermaston ve Velké Británii. Jedná se o studium zařízení pro měření výkonu jaderného reaktoru pomocí Čerenkovova záření. Měření bylo prováděno na lehkovodním reaktoru bazénového typu MERLIN (Medium Energy Research Light Water Moderated Industrial Nuclear Reactor).



Obr. 3-1: Čerenkovovo záření na jaderném reaktoru MERLIN [19]

Byly provedeny experimenty týkající se měření závislosti výkonu reaktoru na intenzitě Čerenkovova záření, které by mohly poskytnout alternativu ke konvenčním ionizačním komorám. Měřena byla aktivní zóna reaktoru pomocí fotonásobiče. Vzhledem k tomu, že se jednalo o reaktor bazénového typu, tak bylo měření Čerenkovova záření rušeno okolními zdroji světla. Pro měření proto byl využit fotonásobič s pozlacenou fotokatodou. Díky takto upravené fotokatodě je fotonásobič citlivý na ultrafialové složky Čerenkovova záření, a to proto, že ostatní zdroje světla mohou způsobit nechtěné rušení při odečítání intenzity záření. Účinnost fotonásobiče je malá, okolo 0,1 %, k překonání šumu byl použit 13 dynodový fotonásobič s napětím 3 kV. Fotonásobič byl uzavřen v hliníkové trubici. Aby mohl být provozován pod vodou, tak je trubice uzavřena křemenným sklem, opatřena sondou vlhkosti a dalšími bezpečnostními opatřeními.



Obr. 3-2: A- Kalibrační křivka Čerenkovova detektoru, B- znázornění odezvy Čerenkovova detektoru [19]

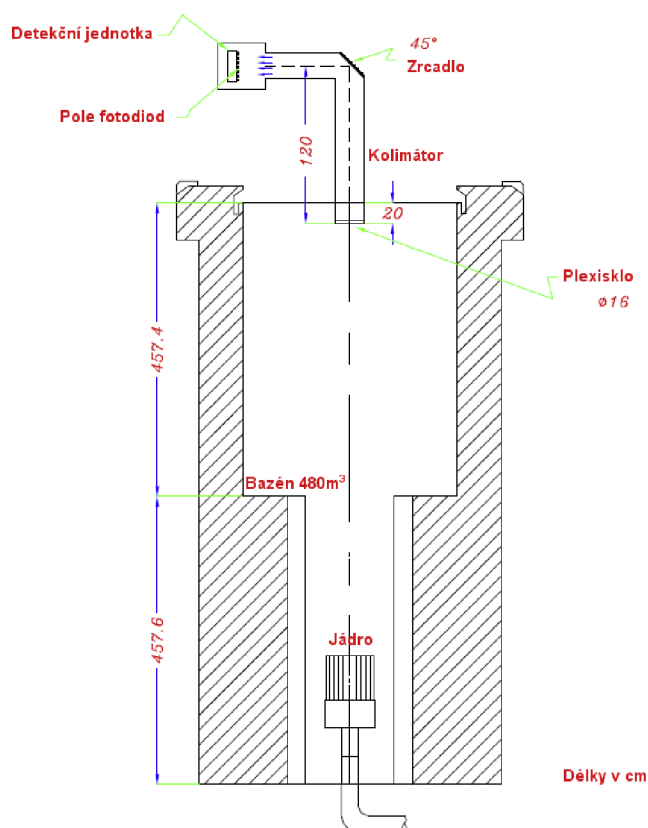
Na obr. 3-4 A je zobrazena kalibrační křivka Čerenkovova detektoru, konkrétně je zde závislost impulsů fotonásobiče a výkonu reaktoru. Křivka není zcela lineární, a to zejména při nízkých výkonech reaktoru. Při bližším zkoumání a porovnání s měřením UV světelného zdroje bylo zjištěno, že při nízké intenzitě světla je nelinearita způsobena charakteristikou fotokatody. Vpravo je znázorněna rychlá odezva Čerenkovova detektoru v závislosti na změně výkonu reaktoru. Je zde porovnání s konvenčním způsobem měření ionizační komorou. Čerenkovův detektor má relativně rychlou odezvu měření v závislosti na změně výkonu, která roste s výkonem. Ovšem po dobu kdy byl výkon reaktoru udržován na stálé hodnotě, tak počet impulsů na fotonásobiči pomalu rostl, což je způsobeno pomalou přeměnou štěpných produktů, při kterých je vyzářeno záření gama. To samé lze pozorovat při odstavení reaktoru, kdy počet impulsů pomalu klesá.

Autoři tohoto experimentu došli k jednoznačným závěrům, že měření výkonu reaktoru pomocí Čerenkovova detektoru je jednou z alternativních možností jak nezávisle určovat výkon reaktoru. Detektor nemusí být přímo umístěn v aktivní zóně, nemusí tak docházet k radiacnímu poškození, detektor může být kompaktní a velmi odolný vůči stárnutí. Ovšem na druhou stranu má tento detektor nevýhodu v nelineární závislosti výkonu reaktoru na počtu impulsů, zvláště pak při nízkých výkonech reaktoru. [19]

### 3.2 Výzkumný reaktor v Teheránu

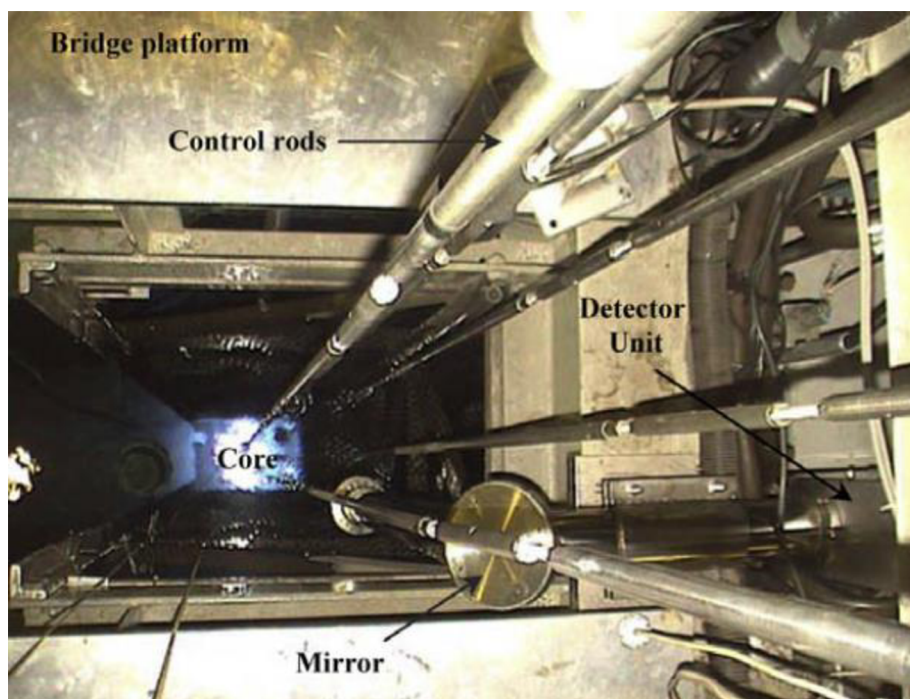
Teheránský výzkumný reaktor je lehkovodní bazénový reaktor s tepelným výkonem 5 MW. V roce 2007 byl na tomto reaktoru zkonstruován nezávislý kanál pro měření výkonu pomocí detektoru Čerenkovova záření. Do té doby byl výkon reaktoru měřen pomocí ionizačních komor.

Měřicí systém se skládá z kolimátoru, fotodiod a zobrazovací jednotky. Kolimátor je zaměřen na aktivní zónu, následně je záření nasměrováno pomocí zrcadla na soubor 25 fotodiod uspořádaných do dvou kruhů o vnější velikosti 36 mm a 22 mm. Signál (napětí) z fotodiod je zesílen a následně veden dvěma větvemi, z nichž na jedné je převeden pomocí deseti bitového A/D převodníku na digitální signál a následně je zobrazen na digitálním displeji výkon v kW. Ve druhé větvi je napětí z fotodiod převedeno na proud v rozsahu 4-20 mA. Druhá větev slouží k zaznamenávání hodnot do počítače.



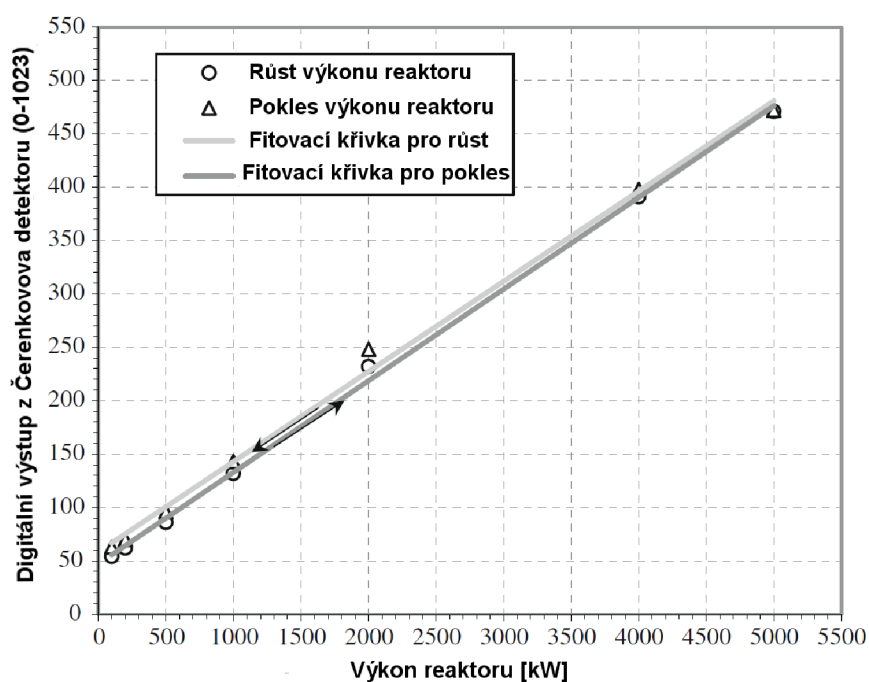
Obr. 3-3: Náskres reaktoru s uspořádáním experimentu [20]

Fotodiody, jako detekční jednotka, byly zvoleny kvůli své nízké ceně, malé velikosti, a kvůli tomu, že k jejich provozu není třeba vysoké napětí. Citlivost fotodiod je 60 % při vlnové délce záření 500 nm. Kolimátor je umístěn přibližně 20 cm pod hladinou a opatřen plexisklem, aby nedocházelo ke zkreslení způsobené vlněním hladiny bazénu a případnými nečistotami na hladině.



Obr. 3-4: Umístění Čerenkovova detektoru v praxi [20]

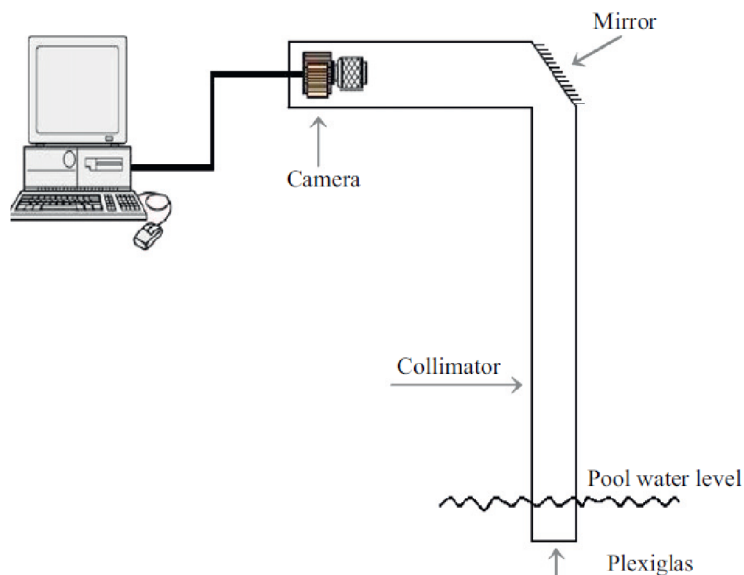
Výstupní signály všech existujících měřicích kanálů jsou pravidelně konfrontovány s naměřenými hodnotami skutečného tepelného výkonu, aby bylo možné se ujistit, že naměřené hodnoty jsou spolehlivé a přesné. Při porovnání těchto hodnot s Čerenkovovým detektorem vyšlo najevo, že jím naměřené hodnoty odpovídají skutečnosti a korelační faktor detektoru je asi 0,9988 s maximální relativní chybou 5 %, zejména při výkonech nad 100 kW. Při nižších výkonech je úroveň zpožděného gama záření srovnatelná s úrovní gama záření pocházejících ze štěpení, proto není závislost intenzity Čerenkovova záření na výkonu reaktoru lineární.



Obr. 3-5: Odezva detektoru při zvyšování a snižování výkonu reaktoru. Výkon reaktoru je měřen pomocí kompenzované ionizační komory. [20]



Dalším důležitým faktorem tohoto systému je schopnost měřit nejen vzrůstající výkon reaktoru, ale také jeho pokles. To znamená, že systém musí reagovat stejně na pokles i na růst výkonu. Výsledky měření jsou zobrazeny na obr. 3-7. Z nichž je patrné, že systém je schopný měřit plynulé zvyšování i snižování výkonu reaktoru. Při porovnání Čerenkovova detektoru s ostatními měřicími systémy (kompenzované a nekompenzované ionizační komory) došli konstruktéři k závěru, že odchylka měření výkonu je maximálně do 1 % vzhledem ke konvenčním ionizačním komorám při plynulém zvyšování a snižování výkonu reaktoru.



Obr. 3-6: Snímání intenzity Čerenkovova záření pomocí kamery [21]

Při jednom z experimentů byly fotodiody nahrazeny VGA kamerou, která snímala intenzitu Čerenkovova záření po odstavení reaktoru. Účelem tohoto experimentu bylo sledování zbytkového tepla reaktoru pomocí snímání intenzity Čerenkovova záření. Naměřené výsledky se neshodovaly s předpokladem. Odchylka byla údajně způsobena indukovanou radioaktivitou neutronovým zářením v konstrukčních materiálech.

Ze závěrů iránských vědců plyne, že detektor Čerenkovova záření lze využít jako jeden z nezávislých systémů pro měření výkonu reaktoru. Z výsledků je zřejmé, že takový systém může poskytnout spolehlivé výsledky a může být použit při měření hlavní části výkonového rozsahu. Výhodou tohoto detektoru je to, že je zkonstruován z konvenčních součástek, zejména pak z levných fotodiód. Další výhodou je, že detektor se nemusí nacházet v bezprostřední blízkosti aktivní zóny, a proto je lépe přístupný údržbě. Na druhou stranu nevýhodou tohoto detektoru je nelineární závislost při měření malých výkonů. Fotodiody mají nevýhodu při nedostatku světla, proti tomu fotonásobiče dokáží pracovat i při malém zdroji světla, díky zesilování signálu. Ovšem fotonásobiče jsou dražší a potřebují vyšší napětí v řádech kV na svůj provoz. [20, 21]



### 3.3 Kontrola použitého paliva

V roce 1993 se na popud IAEA (International Atomic Energy Agency) zapojila Kanada a Švédsko do projektu na vývoj Čerenkov Viewing Device (CVD). Zařízení, které dokáže zaznamenat Čerenkovovo záření. Jako nejvhodnější snímací zařízení byl zvolen UV citlivý CCD čip, který nabízel nejlepší kombinaci vysoké citlivosti, malého šumu, vysokého rozlišení, snadné zaznamenávání naměřených dat a jejich následné zpracování. Zařízení CVD bylo vyzkoušeno v roce 1995 ve skladu paliva ve Švédsku. Pomocí softwarového balíčku SURFER, který obsahoval tři nezávislé programy, které byly využity pro vykreslení Čerenkovova záření, z nichž výstup z jednoho programu byl vstupem pro druhý program atd., byly vyprodukovány dvanácti bitové konturované obrázky záření.

CVD s CCD čipem bylo testováno na varném reaktoru s vyhořelým palivem ve Švédsku a tyto testy ukázaly, že použití CCD čipu má budoucnost u těchto zařízení. Naměřená data jasně ukázala rozdíl mezi palivovými kazetami s vyhořelým palivem a prázdnými kazetami.

Postupně došlo k vývoji dokonalejšího zařízení DCVD<sup>1</sup> Digital Čerenkov Viewing Device, což je zařízení, které dokáže zaznamenávat Čerenkovovo záření z vyhořelých palivových souborů v mokřích skladech. Pod hlavičkou IAEA je toto zařízení neustále zdokonalováno. DCVD je mobilní zařízení, snáze manipulovatelné, tudíž lze měřit v hůře přístupných objektech.

Při kontrole vyhořelého paliva umístí inspektor DCVD nad bazén s palivem, zjistí nejen, jestli je palivo přítomno, ale může podle intenzity naměřeného záření zjistit, jestli jsou dodrženy podmínky uložení paliva. U paliva, které je právě vytaženo z reaktoru způsobuje světelné záření mnoho izotopů. Palivo, které je umístěno ve skladu déle než několik let, je světelné záření emitováno díky gama záření pocházející z přeměny <sup>137</sup>Cs, kvůli je dlouhému poločasu rozpadu, přes 30 let. Pomocí DCVD lze detekovat záření pocházející z vyhořelého paliva, které je staré několik dekád. [23]

#### 3.3.1 Zbytkový výkon jaderného paliva

Po ukončení kampaně je palivo vyjmuté z jaderného reaktoru. Vyjmuté palivo není zcela vyhořelé, to znamená, že v něm pořád probíhají jaderné reakce. Ve vyhořelém jaderném palivu proto dochází k uvolňování zbytkového tepla, které je nutné odvádět, neboť při zvyšování tepla by mohlo dojít k odpařování vody a destrukci palivových článků. Pro další postup skladování je nutné tedy znát zbytkový výkon vyhořelého jaderného paliva.

Hlavním zdrojem tepla z právě vyvezených vyhořelých palivových souborů jsou aktinidy<sup>2</sup> a štěpné produkty. To platí pro desítky let od vyvezení paliva. Pro delší časová období, stovky let, jsou nejvýznamnějším zdrojem tepla aktinidy, které mají extrémně dlouhý poločas rozpadu. [24]

Palivo je po vyjmutí z aktivní zóny reaktoru přesunuto do bazénu vyhořelého paliva, kde klesne jeho aktivita na takovou hodnotu, až může být umístěno do kontejneru do meziskladu vyhořelého paliva, kde je skladováno desítky let. Dokud nebude rozhodnuto o jeho dalším uložení.

<sup>1</sup> Více o DCVD v kapitole 4.1.1 Digitální detektor Čerenkovova záření

<sup>2</sup> Aktinidy jsou izotopy a jejich dceřiné produkty v oblasti těžkých jader (izotopy plutonia, neptunia a dalších). Mají nižší aktivitu než štěpné produkty, ale velmi dlouhý poločas rozpadu.

### 3.3.2 Detektory používané IAEA

International Atomic Energy Agency vznikla v roce 1957 v rámci OSN, jako světové centrum pro spolupráci v oblasti jaderné energie. Agentura spolupracuje se všemi svými členskými státy na podpoře, zabezpečení a mírovém využití jaderné energie. IAEA neustále ověřuje a kontroluje úplnost prohlášení všech členských států o jejich jaderném materiálu a činnosti spojené s ním. Inspektoři IAEA, kteří kontrolují jaderné aktivity jednotlivých států, mají k dispozici mnoho nástrojů. Některé z nich byly vyrobeny speciálně pro IAEA (viz. DCVD).

Mezi přístroje, které používají inspektoři z IAEA, patří přibližně 1250 kamer nainstalovaných ve 33 zemích. Některé z kamer jsou přímo propojeny s velitelstvím IAEA ve Vídni. Kamery dokáží snímat 180° oblast. Jsou umístovány do reaktorových hal vysoko u stropu, aby zaznamenávaly veškeré aktivity, co se dějí pod nimi. Dalším z monitorovacích zařízení je trojrozměrný laserový skener, který porovnává naměřená data a dokáže vyhodnotit, zda byly provedeny nějaké změny v uspořádání elektrárny. Zajišťuje, aby uspořádání jaderného zařízení bylo v souladu s plány, které byly předloženy IAEA.

Některé z nástrojů používaných při zajišťování bezpečnosti jsou přímo instalovány v jaderných zařízeních, jiné jsou kapesní, flexibilní a adaptabilní na různé použití. Jedny z nejpoužívanějších nástrojů jsou digitální fotoaparát, záznamník a metr. Jedním ze specifitějších zařízení je HM-5 Hematology Analyzer. Jedná se o ruční detekční zařízení, které může být použito při hledání jaderných materiálů, dokáže identifikovat izotopy, a v případě uranu určit i jeho obohacení. Pro měření gama záření využívají inspektoři přístroj zvaný InSpector 2000 MultiChannel Analyzer, který je přímo propojen s počítačem pro ukládání a zobrazení záznamů. Systém se používá k měření obohacení uranu uzavřeném v kovovém válci.

Pro zabránění manipulace, během nepřítomnosti komisařů, s některými předměty používá IAEA vlastní plomby s unikátním vyraženým číslem. Zajímavostí je, že IAEA využije přibližně 20 000 těchto plomb ročně.

V neposlední řadě používají inspektoři ke své práci také DCVD pro detekci Čerenkovova záření vycházejícího z palivových souborů.

V současné době má IAEA asi 245 kontrolorů, kteří pracují na dvou tisících misích ročně a dohlížejí na to, aby byl jaderný materiál a práce s ním spojené využívány výhradně pro mírové účely. Kontrolovány jsou jaderné elektrárny, výzkumné reaktory, zařízení na výrobu a přepracování paliva, obohacovací závody a skladovací zařízení. [25, 26]

## 3.4 Detekce Čerenkovova záření v astrofyzice

V současné době je detekce Čerenkovova záření nejvíce využívána v oblasti astrofyziky. Detektory se využívají pro detekci kosmického záření. Díky získaným poznatkům je možné studovat například zánik vzdálených hvězd. Kosmické záření je vysokoenergetické záření pocházející z vesmíru. Je tvořeno zejména protony, dále pak jádru helia a dalších prvků. Energie částic kosmického záření se pohybuje v širokém rozmezí  $10^3$  až  $10^{14}$  MeV. Měření kosmického záření je velmi specifické a lze ho rozdělit na detekci primárního kosmického záření a detekci sekundárního kosmického záření. Sekundární kosmické záření vzniká z primárního kosmického

záření při průniku atmosférou, dojde-li k interakci s částicemi vzduchu. Sekundární kosmické záření poté dopadá na zemský povrch. [27]

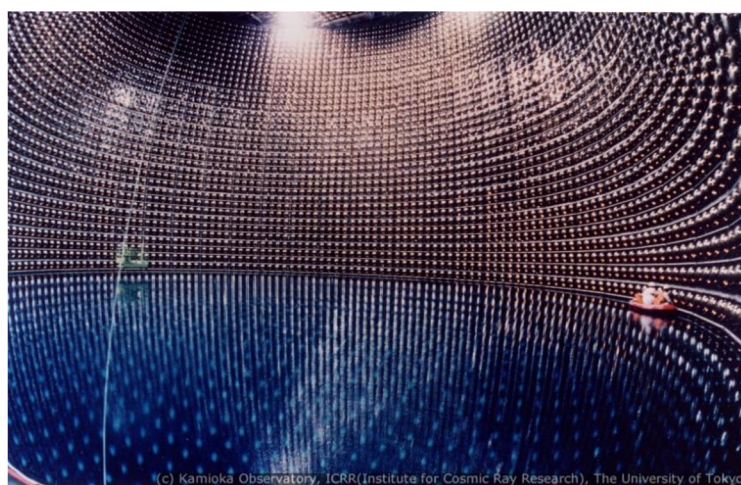
Primární kosmické záření může být zachyceno detektory umístěnými v satelitech na oběžné dráze. Pro detekci sekundárního kosmického záření, jenž dopadá na zemský povrch, jsou používány scintilační detektory a také vodní Čerenkovovy detektory. Záření z Čerenkovova detektoru je detekováno pomocí fotonásobičů. Detektory jsou rozmístěny po prostoru a zaznamenávají spršky částic v průběhu několika mikrosekund. Jakmile jsou analyzovány impulsy z jednotlivých detektorů, tak je možné určit přibližný směr příletu spršky částic.

V současné době je v Argentinské stepi v provozu soustava detektorů zvaná Pierre Auger podle slavného francouzského fyzika. Součástí tohoto projektu je více než 1600 detektorů rozestavěných na ploše 3000 km<sup>2</sup>, což odpovídá přibližně velikosti Libereckého kraje. Detektory jsou složeny ze sudů s obsahem asi 12000 litrů vody, které jsou přibližně 1,5 km od sebe. Částice kosmického záření vnikají do vody, kde vznikne Čerenkovovo záření, které je zaznamenáváno pomocí tří fotonásobičů. [28]



Obr. 3-7: Ukázka jednoho z detektorů observatoře Pierre Auger [29]

Dalším detektorem, který slouží k zachycování neutrin ze slunce, se nachází v Japonsku. Nazývá se Super-Kamiokande. Jedná se o kruhový bazén s průměrem kolem 40 metrů a hloubkou přes 41 metrů. Bazén je umístěn přibližně 1 km pod zemským povrchem a napuštěn je velmi čistou vodou. V tomto detektoru se využívá toho, že neutrino ze slunce předá svoji energii elektronům ve vodě a vznikne Čerenkovovo záření, které je detekováno pomocí fotonásobičů. V tomto detektoru se poprvé podařilo určit směr neutrin a zjistit, že přicházejí od slunce. [30]



Obr. 3-8: Detektor Super-Kamiokande v Japonsku [30]

## 4 DETEKTORY ČERENKOVA ZÁŘENÍ

### 4.1 Detektory

V praxi se Čerenkovova jevu využívá ke zkoumání pohybu částic vysoké energie, v oblasti běžných energií jsou použitelné pro detekci elektronů. Čerenkovovými detektory je možno měřit energii těchto částic. Používají se u velkých urychlovačů či při detekci kosmického záření.

V nejjednodušším případě jsou Čerenkovovy detektory složeny z průhledného dielektrika s vysokým indexem lomu  $n$ , v němž prolétající nabitě částice rychlostí vyšší než je fázová rychlost světla, a vzbuzují Čerenkovovo záření, které dopadá na fotokatodu fotonásobiče, fotodiodu nebo CCD čip, kde je převáděno na elektrické signály. Velikost a tvar dielektrika je různý. Od malých detektorů pro detekci malých prostorových úhlů, až po velké detektory, jsou používány různá detekční prostředí (dielektrika – látka, která má schopnost polarizace, v některých literaturách je detekční prostředí též nazývané radiátorem), pevné látky, jako jsou sklo a plexisklo, kapalné, například voda a v neposlední řadě může být radiátor i plynný. Aby fotony dopadali na detekující zařízení, jsou někdy použity i různé optické soustavy. Díky měření množství fotonů a úhlu jejich emise vůči dráze částice je možné, měřit směr dráhy částice a její energii.

Časová odezva Čerenkovových detektorů je nejrychlejší ze všech známých detektorů, protože samotný čas depolarizace je řádově v jednotkách ps. Praktická odezva detektoru je v řádech ns, zpoždění je dáno vlastnostmi mnohem pomalejších detekčních jednotek, například fotonásobiče.

Zásadním problémem, se kterými se detektory potýkají, je malý počet fotonů emitovaných z dráhy částice. Podle Franka a Tamma je počet fotonů na 1 m délky dráhy částice, dán vztahem

$$N = \frac{2\pi \cdot Q^2}{137 \cdot c} \cdot \Delta f \cdot \sin^2 \theta. \quad (4.1)$$

Kde  $Q$  je náboj částice a  $\Delta f = \langle f; f + df \rangle$ , interval frekvencí Čerenkovova záření.

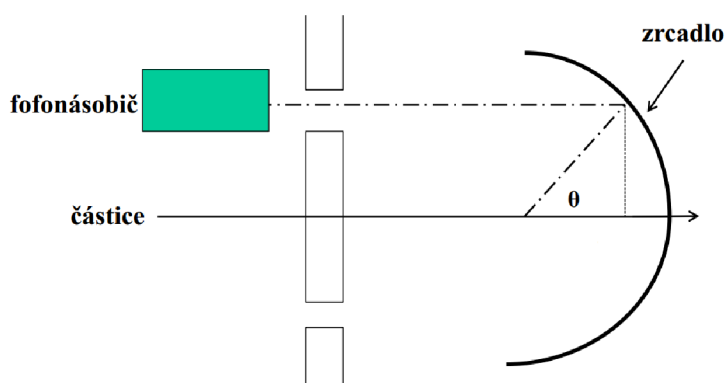
Na příklad ve vodě vzniká za optimálních podmínek přibližně 200 fotonů na centimetr dráhy elektronu. Ovšem toto číslo může být ještě menší, pokud nejsou podmínky ideální. Toto značí, že jsou kladeny velké nároky na detekci fotonů. Fotonásobič musí mít dobrý kontakt s měřeným prostředím, v prostředí musí být nízký šum, dále je nutné zajistit nízkou absorpci záření v prostředí atd. Moderní fotonásobiče s velkou kvantovou účinností kolem 25 % jsou pro tyto účely vhodné, problémem však zůstává co nejdokonalejší sběr fotonů na fotokatodu. Dalším problémem, který omezuje přesnost detektoru, je tzv. chromatická chyba. Jedná se o závislost indexu lomu  $n$  na vlnové délce  $\lambda$ . Pro zmírnění této chyby je méžné redukovat rozsah energií fotonů, čímž ale o značnou část fotonů přijdeme. Teoreticky by tuto chybu odstranilo měření každého fotonu samostatně, čehož ale detektor není schopen.

Detektory se dají rozdělit do dvou kategorií. První z kategorií lze označit jako prahové detektory (nefokusované). Ty detekují pouze částice, které mají vyšší energii, než je energie prahová. Prahovou energii lze měnit v jistých mezích pomocí volby dielektrika (radiátoru) s různými indexy lomu. Takovýto Čerenkovův detektor tedy pouze zaznamená přítomnost částic. Druhým typem detektorů jsou diferenciální detektory (fokusované), které jsou schopny zaznamenat úhel  $\theta$  a stanovit rychlost a energii částice. Záření je v těchto detektorech fokusováno z radiátoru pomocí čočky ve směru její optické osy do určitého místa. Energetická rozlišovací schopnost souvisí s přesností měření úhlu  $\theta$ , která je závislá na průměru a rozbíhavosti svazků fotonů, resp. na optických vlastnostech systému.

Vývoj Čerenkovových detektorů je úzce spjat s vývojem materiálů, které se používají na výrobu fotokatod citlivých na světlo.

Čerenkovovy detektory využívající fotonásobič nemohou být použity, tam kde je velké magnetické pole vytvořené solenoidy, které se používají k měření hybnost nabitých částic.

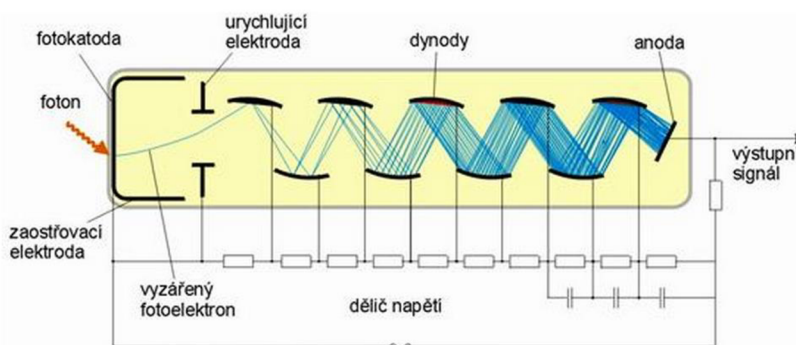
Mezi nejrozšířenější konstrukci Čerenkovových detektorů patří prstencové zobrazovací detektory RICH (z anglického Ring Imaging Cherenkov detector). Tyto detektory byly vyvinuty pro účely směrové detekce vysokoenergetických částic. Využívají toho, že vznikající Čerenkovovo záření má tvar pláště kužele, které je pak zaznamenáno na povrchu detektoru ve tvaru prstence. Detektory jsou tvořeny soustavou sférických i rovinných zrcadel, které odrážejí fotony, vznikající podél dráhy částice v optickém mediu a směřují je na fotodetektor. Částice mohou být též směřovány na fotodetektor přímo, jedná se o nefokusované detektory, nebo pomocí zrcadla, fokusované detektory. Nefokusované detektory musejí mít tenkou vrstvu radiátoru, aby nedocházelo k rozšiřování či úplnému vyplnění prstence. Rychlost částice lze pak vyvodit z poloměru zachyceného prstence na fotodetektoru. Fokusované a nefokusované detektory lze vhodně kombinovat. [9, 10, 11]



Obr. 4-1: Schematické znázornění detektoru RICH [11]

### Fotonásobič

Zařízení, které přeměňuje velmi slabé elektromagnetické záření na měřitelný elektrický proud. Foton dopadá na fotokatodu, která na základě fotoelektrického jevu způsobí emisi elektronů. Mezi fotokatodou, zaostřovací elektrodou a urychlující elektrodou vzniká elektrické pole, které urychluje a vychyluje fotoelektrony emitované z fotokatody. Fotoelektrony dopadají na první dynodu.



Obr. 4-2: Princip fotonásobiče [11]

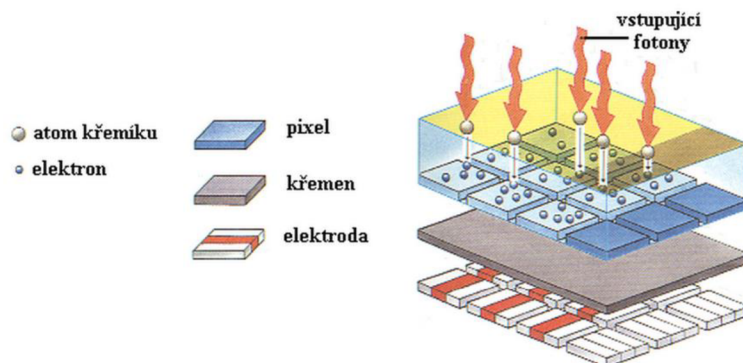
Dynoda je jedna z několika elektrod uvnitř fotonásobiče. Každá dynoda má větší kladný potenciál než předchozí. Na povrchu každé dynody nastává sekundární emise elektronů. Elektrony z fotokatody jsou urychleny k první dynodě, na níž je udržováno kladné napětí vůči fotokatodě. Každý urychlený elektron, který dopadne na povrch dynody, způsobí sekundární emisi několika elektronů. Ty jsou urychlovány k další dynodě, která má napětí vyšší než předchozí. [11]



## CCD

CCD přeměňuje energii dopadajícího světla na energii elektrického signálu. Jedná se o světločivý křemíkový plátek uložený nad kovovou elektrodou, která je izolována vrstvou křemene. Základním principem celého zařízení je opakování dvou základních kroků 25krát za sekundu.

V prvním kroku dopadají fotony na atomy křemíku, odkud se na základě fotoefektu uvolňují záporně nabitě elektrony. Kladně nabitá elektroda, která je umístěná pod každým pixelem a oddělená od křemíku izolační vrstvou křemene, zachycuje takto uvolněné elektrony. Dopadne-li na CCD více světla, vytváří se obraz, v němž jasné oblasti odpovídají pixelům, z nichž se uvolnilo více elektronů.



Obr. 4-3: CCD čip [12]

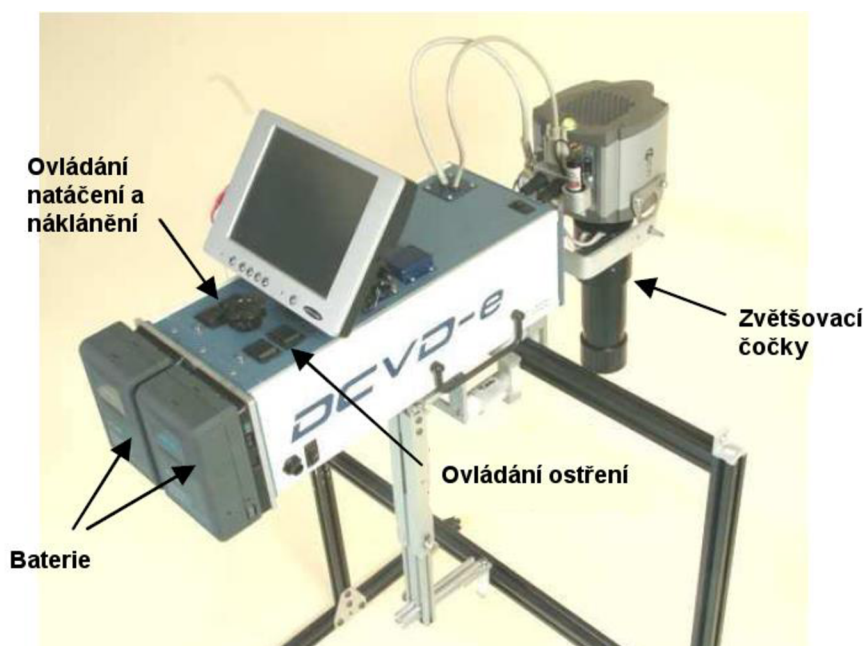
Měření probíhá tak, že se kladný náboj vlnivě přesouvá podél elektrod v každém sloupci pixelů a „stahuje“ elektrony z jednoho pixelu na druhý. Elektrony v nejnižším čidle sloupce se pak přenesou do CCD uspořádaných v řadě za sebou, přičemž každá řada obsahuje svoji sadu elektrod. Ty tlačí skupiny elektronů jednu po druhé, až k terminálu na konci zařízení, po přečtení celé řady se celý proces opakuje, takže se postupně přesouvá další řada elektronů. [12]

## Fotodioda

Je polovodičová součástka s PN přechodem. Je zkonstruována tak, že do PN přechodu proniká světlo, na které je dioda citlivá. Pro měření Čerenkovova záření je využit zejména 4. kvadrant charakteristiky diody, zde se dioda chová jako zdroj elektrické energie. Se zvyšující se intenzitou dopadajícího světla se na anodě objeví napětí až několik desetin voltů. Fotodioda reaguje velmi rychle na změny osvětlení. Při použití více fotodiód při měření je možné detekovat vyšší napětí.

### 4.1.1 Digitální detektor Čerenkovova záření

V kapitole 3.3 Studium Čerenkovova záření a jeho detekce v souvislosti s jadernými elektrárnami byl zmíněn přístroj DCVD – Digital Cherenkov Viewing Device, který je v současné době nevhodnějším zařízením pro měření Čerenkovova záření v oblasti jaderné energetiky. V téže kapitole byli již zmíněny detektory s fotonásobiči, či fotodiodami, ovšem DCVD je kompaktní měřicí přístroj. Další aspektem hovořícím pro DCVD je schopnost měřit jednotlivé zdroje záření v jednom záběru samostatně. Fotodiody a fotonásobiče nejsou schopny rozlišit jednotlivé zdroje záření. Dokáží pouze k rostoucí intenzitě záření přiřadit výkon.



Obr. 4-4: Popis DCVD [31]

DCVD je připevněno k zábradlí na okraj bazénu a snímá ultrafialovou složku Čerenkovova záření. Slouží ke kontrole prezenze palivových souborů v bazénu vyhořelého paliva. Objektiv DCVD je schopný z jednoho místa zabrat veškeré palivo, tudíž není nutné s palivem nikterak manipulovat, pořizování záznamu trvá jen několik sekund.

Detektor se skládá z EMCCD čipu (electron-multiplied charged-coupled device), jedná se o CCD čip s multiplikací elektronů. Snímací část společně s objektivem je umístěna na hlavě detektoru, která je poháněna motorkem, což umožňuje manipulaci objektivu. Objektiv umožňuje přepínání mezi UV režimem a normálním pohledem. Dále je na detektoru umístěna dotyková obrazovka sloužící k zobrazování a následné manipulaci s pořízenými snímky. Ke zlepšení orientace v palivových souborech je detektor vybaven laserovým ukazovátkem. V zadní části detektoru jsou umístěny baterie sloužící k napájení celého systému. Díky bateriím je celý systém mobilní.

Schopnost přístroje dobarvit jak viditelné, tak UV záření, umožňuje ověřit i vyhořelé palivo, které se chladí až 40 let s vyhořením 10 000 MWd/t. V módu viditelného světla, jsou palivové tyče zobrazeny jako tmavé oblasti, zatímco mezery mezi tyčemi, vodní kanály vyzařují charakteristické modré světlo.

Každý druh paliva má specifickou geometrii, která ovlivňuje intenzitu Čerenkovova záření. Geometrie je ovlivněna kombinací palivových tyčí, distanční mříží, horní deskou apod. Obecně lze říci, že soubory s vícero palivovými tyčemi vytvoří více záření. Intenzita záření je závislá na více parametrech, jako je například vyhoření paliva, čas chlazení. Dále je důležitý objem vody mezi palivovými tyčemi. Více vody znamená méně paliva, tudíž menší intenzita záření, avšak čím více vody, tím větší objem, kde může gama interakce vyvolat emisi Čerenkovova záření. Faktorů, které ovlivňují intenzitu Čerenkovova záření je mnoho, počínaje druhem paliva, jeho uspořádáním, přes odrazivost materiálu palivových souborů a tím i příspěvkem odrazů, záření od okolních palivových souborů, až po kvalitu vody.

Jako většina měřících přístrojů je potřeba DCVD kalibrovat před každým měřením. Samotnou kalibraci přístroje lze rozdělit do dvou částí, pre-kalibrace a kalibrace. Pre-kalibraci je možno

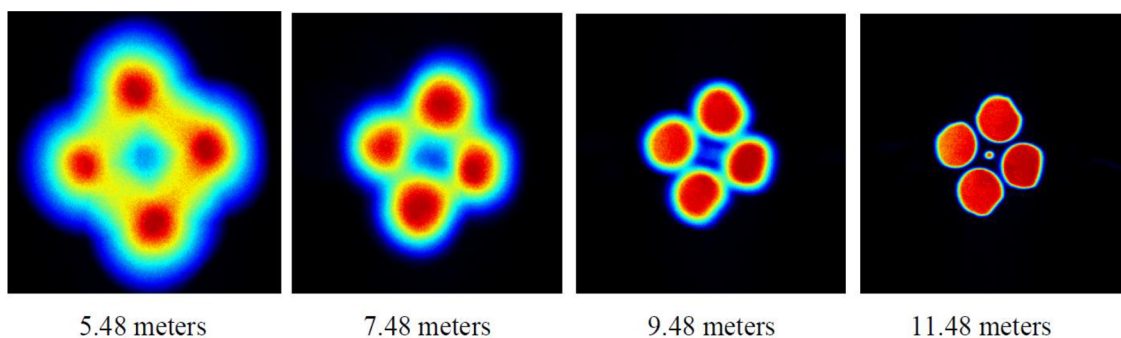
provést přes samotným měřením. Jedná se o nastavení přístroje vzhledem k charakteru měření. Samotná kalibrace na místě musí být velmi pečlivě provedena a musejí být provedeny kontrolní měření s ohledem na různou kvalitu vody apod. Nicméně v případě DCVD jsou i další faktory, které mají vliv na kalibraci. Jsou to například osvětlení v bazénové hale, či okolní vlivy paliva.

Pro kalibrování DCVD byl vyvinut tzv. CLS – calibration light source, tedy zdroj světla určený ke kalibraci. Testování CLS bylo provedeno na jaderné elektrárně Forsmark. CLS je vlastně tvořen čtyřmi UV diodami.



Obr. 4-5: CLS, Kalibrační zdroj UV světla [32]

CLS je uchycen dvěma lany při pod DCVD a je spouštěn dolů pod hladinu. Na jednom z lan je přichycen napájecí kabel.



Obr. 4-6: Hloubka ponoření CLS do bazénu a jeho zobrazení na detektoru DCVD [32]

Na obrázku výše je možné vidět ponořování kalibračního zdroje do bazénu s palivem, aby mohl být detektor Čerenkovova záření DCVD kalibrován. Vzdálenost hladiny bazénu od DCVD je 4,48 m. Při postupném vzdalování kalibračního zdroje je možné pozorovat úbytek intenzity Čerenkovova záření. Ve vzdálenosti 11,48 m se nachází uložené palivo. V této vzdálenosti lze CLS považovat za bodový zdroj. Jeho intenzita v různých vzdálenostech klesá s druhou mocninou.

$$\Phi_B = \frac{\Phi}{r^2}, \quad (4.2)$$

kde  $\Phi_B$  je světelný tok naměřený,  $\Phi$  je světelný tok z referenčního zdroje světla a  $r$  je vzdálenost CLS od DVCD.



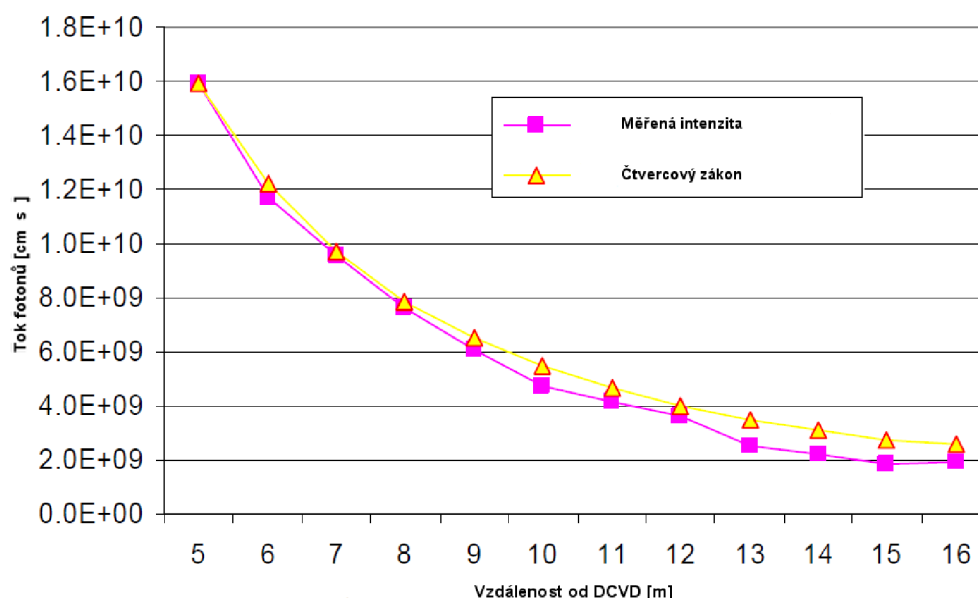
$$\Phi_B = \frac{\Phi}{r_c^2} \quad (4.3)$$

Naměřené hodnoty musejí být rovněž korigovány kvůli lomu způsobenému vodní hladinou. Potom tedy:

$$r_c = r_{voda} + nr_{vzduch} \quad (4.4)$$

kde  $r_{voda}$  je vzdálenost CLS od vodní hladiny a  $r_{vzduch}$  je vzdálenost DVCD od povrchu vodní hladiny a  $n$  je index lomu vody.

První naměřená hodnota 5,48 m, což je jeden metr pod hladinou bazénu, je vzata jako počáteční hodnota pro výpočet čtvercového zákona.



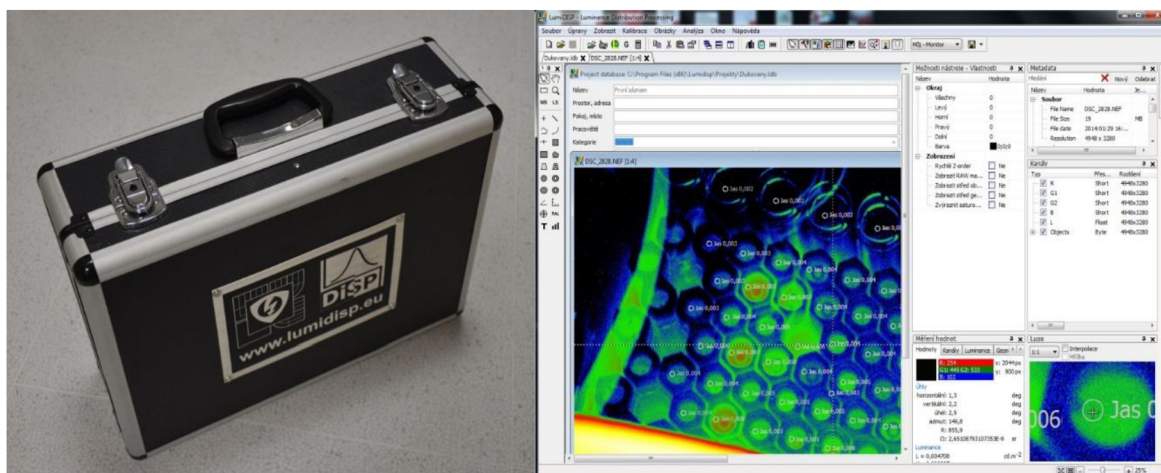
Obr. 4-7: Intenzita záření kalibračního světelného UV zdroje CLS jako funkce vzdálenosti od DCVD [32]

Na obrázku 4-7 je vidět porovnání naměřených a vypočítaných hodnot intenzity záření CLS v závislosti na vzdálenosti od DCVD. Naměřené hodnoty se téměř shodují s výpočtem, odlišnost nastává až při vyšší hloubce, což ukazuje pravděpodobně nějaké nečistoty, které pohlcují UV záření. Ovšem odlišnost je minimální a tudíž zanedbatelná.

Další z mnoha měření pomocí DCVD proběhlo na jaderné elektrárně Ringhals ve Švédsku. Bylo měřeno 16 palivových kazet, které byly umístěny v mřížové síti 4x6. Při měření bylo zjištěno, že nelze rozeznat intenzitu záření měřené kazety od okolních 3 až 4 kazet se stejným vyhořením a stejnou dobou chlazení. Měření bylo prováděno z důvodu, zda DCVD dokáže odhalit přesun 50 % palivových kazet z bazénu. Palivové tyče by byly nahrazeny nerezovou ocelí nebo zirkoniem. Při nahrazení takového množství palivových tyčí by měla poklesnout intenzita Čerenkovova záření. Závěr měření byl takový, že detektor DCVD, je schopen rozeznat záměnu paliva z 50%, dokonce i jenom z 30% nebo 15% chybějícího vyhořelého paliva. [31, 32, 33]

## 5 LUMIDISP

LumiDISP je kompaktní systém pro fotometrické měření jasu a jeho distribuce. Název „LumiDISP“ vznikl z anglických slov luminance distribution processing. Software byl vyvinut na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně. Hlavním cílem bylo vyvinout program, kterým bude možné analyzovat digitální fotografie a zjistit rozložení fotometrické veličiny jasu, a získat tak hodnotu jasu v libovolném bodě, případně oblasti. Jas není závislý na vzdálenosti měření, ale může být závislý na úhlu měření, proto je vhodné umístit fotoaparát do místa pozorování. LumiDISP nabízí řešení, jak využít běžně dostupné fotoaparáty k měření jasu a jeho distribuce. Měření s profesionálními přístroji, jasoměry, a následná analýza výsledků je poměrně zdlouhavá záležitost. Měření je sice přesné, ale zabere mnoho času. Na druhou stranu měření pomocí programu LumiDISP je velmi rychlé, stačí pořídit digitální fotografii, kterou lze nahrát přímo z fotoaparátu do počítače, případně přenést na paměťové kartě a následně provést výpočet svítivosti softwarově, což program udělá pro každý pixel zvlášť. Program samozřejmě bere v úvahu prostorový úhel každého pixelu, který je odlišný. Program je schopen opravit případné chyby konkrétního objektivu fotoaparátu. Správná spektrální korekce se provádí pomocí vícevrstvého speciálního filtru. Tyto informace lze závěrem shrnout, že LumiDISP lze prakticky použít k běžně dostupnému fotoaparátu, který pořizuje fotografie v dostatečné kvalitě, a bude kalibrován pro software LumiDISP. Získáme tak přehled o rozložení jasu a díky možnosti vytvoření jasové mapy je možné získat hodnoty jasu v kterémkoliv bodě či oblasti. Ovšem je nutné získat metadata a pomocí kalibrační funkce vytvořit jasové rozložení. [15]



Obr. 5-1: Ukázka LumiDISP sady a pracovního prostředí programu [15]

## 6 ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT V JADERNÉ ELEKTRÁRNĚ DUKOVANY

V lednu 2014 proběhlo první měření v rámci analyzování Čerenkovova záření. Jednalo se o focení palivových kazet v bazénu vyhořelého paliva. Prvotní myšlenkou provedení tohoto experimentu bylo využití již vyvinutého programu LumiDISP k měření vyhoření paliva. Případně ve větším měřítku šlo o myšlenku nezávislého měření výkonu jaderného reaktoru. Vzhledem k využití běžně dostupného fotoaparátu a programu LumiDISP se jedná o velmi levnou a jednoduchou variantu měření.

### 6.1 Jaderná elektrárna Dukovany

Jaderná elektrárna Dukovany je jedna ze dvou jaderných elektráren na území České republiky. Dukovany byly uvedeny do plného provozu v roce 1987. Celkový instalovaný elektrický výkon je rozdělen do čtyř bloků, jeho hodnota v současné době činí 4 x 510 MWe. Jaderná elektrárna má tedy čtyři tlakovodní reaktory VVER<sup>3</sup> 440/213.



*Obr. 6-1: Pohled na zavážecí stroj, který se nachází nad bazénem vyhořelého paliva, a na přípravu měření. JE Dukovany.*

V jaderném reaktoru elektrárny se vyměňuje pětina palivových souborů ročně. Ovšem ještě než je palivo uloženo do transportně-skladovacích kontejnerů CASTOR a uloženy ve skladu použitého paliva, tak je palivo přesunuto do bazénu pro vyhořelé palivo, který se nachází vedle reaktoru. Zde je palivo umístěno do té doby, než poklesne jeho radioaktivita a dojde k jeho ochlazení. Vyhořelé palivo je tedy umístěno do bazénu s vodou, která slouží jako stínící médium, ochrana personálu a zároveň je voda v bazénu chladičem, které odvádí zbytkové teplo. [35]

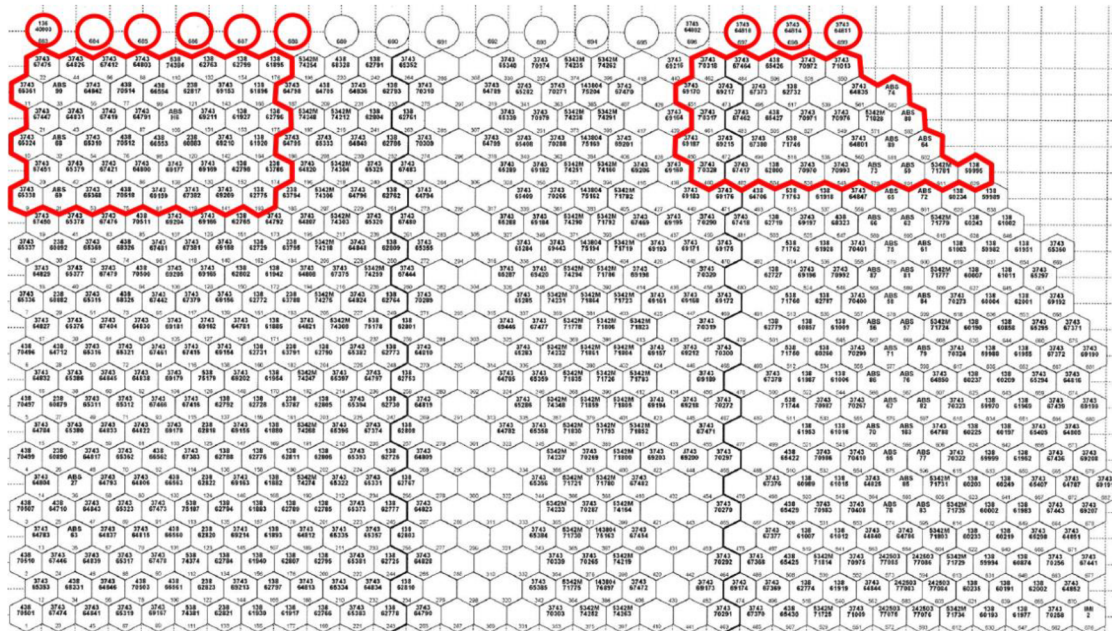
<sup>3</sup> VVER znamená vodou chlazený, vodou moderovaný energetický reaktor.



## 6.2 Naměřená data a zpracování

Účelem tohoto experimentu bylo nafocení palivových kazet pomocí fotoaparátu, následné zpracování fotografií s Čerenkovovým zářením v programu LumiDISP, přiřazení jednotlivým palivovým kazetám jas Čerenkovova záření. Následně konzultovat možnosti přiřazení jednotlivých hodnot jasu k hodnotám vyhoření jednotlivých palivových kazet, a nalézt určitou závislost mezi těmito hodnotami.

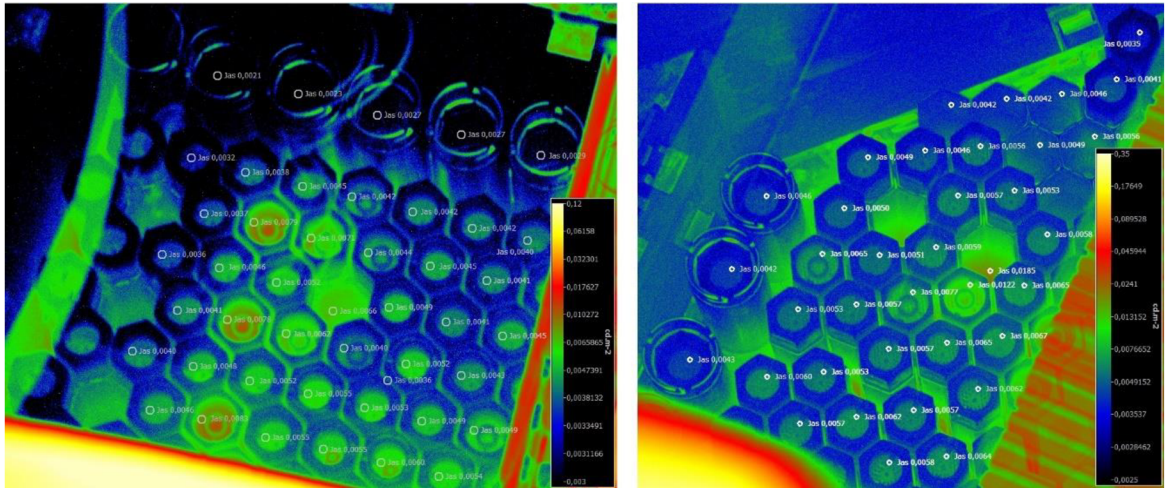
Měření bylo provedeno pomocí digitálního zrcadlového fotoaparátu Nikon D7000 s objektivem Nikon AF-S DX NIKKOR 18–105 mm. Fotoaparát byl umístěn na klasickém stativu. Celý komplet byl pak umístěn na plošině zavážecího stroje, odkud byla snímána část bazénu s vyhořelým palivem. Při tomto měření nebyl použit filtr s úpravou spektrální citlivost fotoaparátu<sup>4</sup>.



Obr. 6-2: Schéma uspořádání bazénu s vyhořelým palivem s vyznačenými měřenými oblastmi.

Pro samotný okamžik měření-focení bylo domluveno vypnutí osvětlení reaktorového sálu, aby lépe vyniklo Čerenkovovo záření. Z bezpečnostních důvodů bylo nutné ponechat některé zdroje světla zapnuté. Tato skutečnost ovlivnila přesnost měření jasu jednotlivých palivových kazet uložených v bazénu.

<sup>4</sup> Více o filtru s úpravou spektrální citlivost fotoaparátu v kapitole 6.4.1 První měření

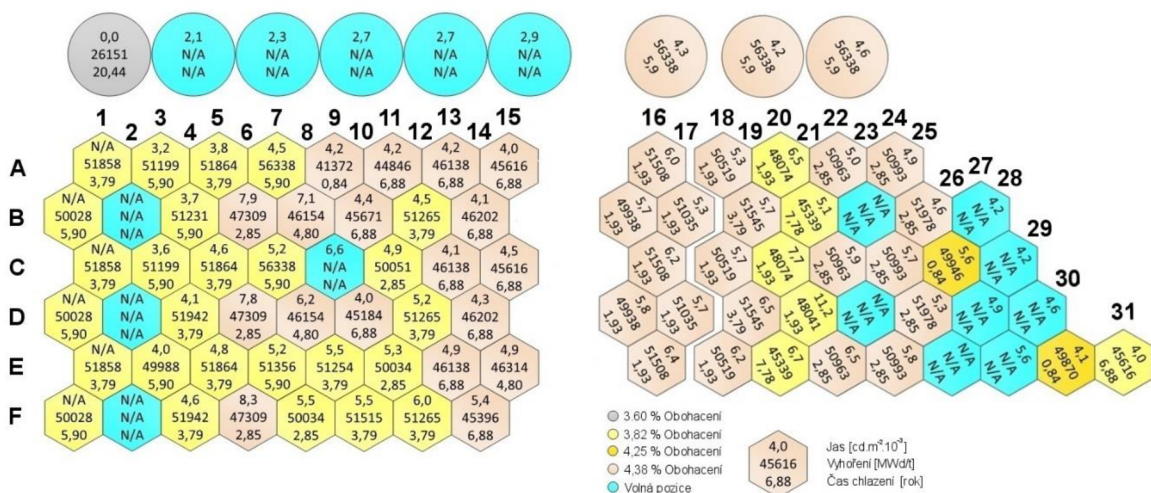


Obr. 6-3: Jasová mapa bazénu vyhořelého paliva EDU. Měřená oblast jasu je kruh o průměru 20 pixelů.

Dalším faktorem, který měl negativní vliv na přesnost měření, byl úhel snímání palivových kazet. Prostředí neumožňovalo pořizovat snímky z kolmého směru.

Při měření byly tedy nafoceny části bazénu s palivovými kazetami, jas jednotlivých palivových kazet byl vyhodnocen v LumiDISP. Jednotlivým palivovým souborům byl přiřazen kruh o průměru 20 pixelů, kde byl měřen jas. Naměřené hodnoty jasu byly poté spojeny s hodnotami vyhoření paliva a délkou jeho skladování v bazénu.

V Tab. 0-1 (Příloha) jsou hodnoty seřazeny podle vyhoření paliva, aby je bylo možné porovnat se střední hodnotou jasu naměřenou na jednotlivých palivových souborech.



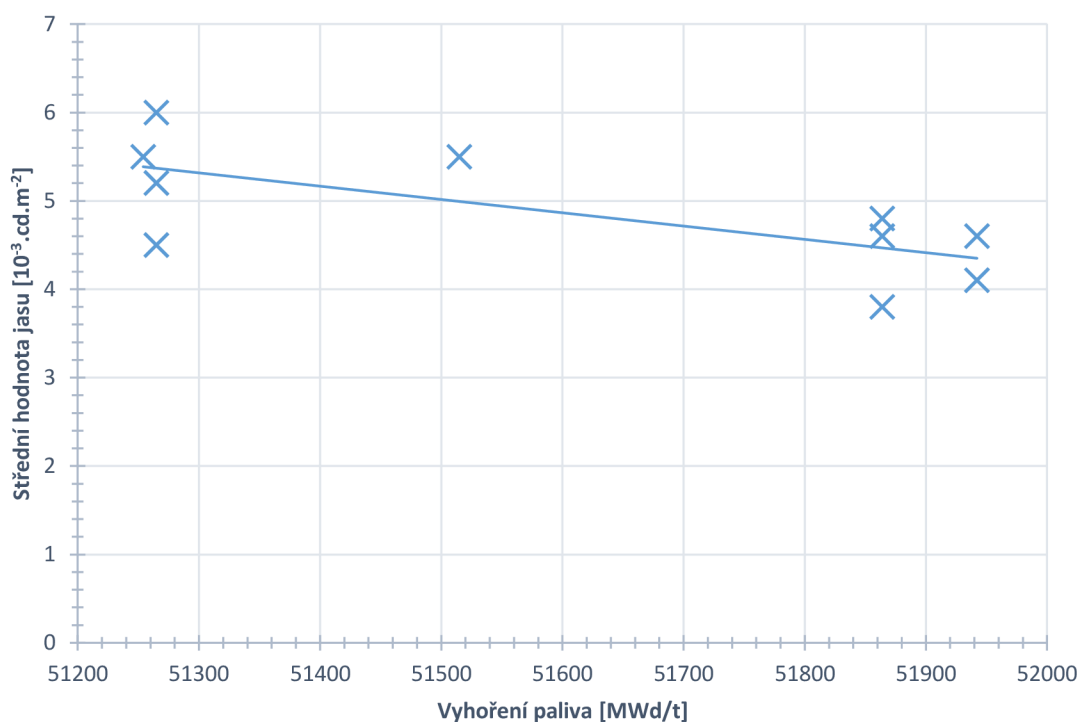
Obr. 6-4: Grafické zpracování měřené oblasti bazénu se zaznačenými naměřenými hodnotami

V následující tabulce jsou zobrazeny vybrané hodnoty jednotlivých palivových souborů, které mají stejné obohacení paliva a stejnou dobu chlazení v bazénu. Jednotlivé palivové soubory jsou označeny pozicí, která je znázorněna výše na obr. 5-4.

Tab. 6-1: Vybrané hodnoty palivových kazet se stejným obohacením a stejnou dobou chlazení

Pozice	Jas [ $10^{-3} \cdot \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ]	Vyhoření [MWd/t]	Doba chlazení [rok]
A5	3,8	51864	3,79
B12	4,5	51265	3,79
C5	4,6	51864	3,79
D12	5,2	51265	3,79
D4	4,1	51942	3,79
E5	4,8	51864	3,79
E9	5,5	51254	3,79
F10	5,5	51515	3,79
F12	6	51265	3,79
F4	4,6	51942	3,79

Ze zpracovaných hodnot není výrazně patrná závislost střední hodnoty jasu palivových kazet na vyhoření paliva.



Obr. 6-5: Sřední hodnota jasu v závislosti na vyhoření jaderného paliva

### 6.3 Shrnutí

Z naměřených výsledků je zřejmé, že samotné měření bylo ovlivněno mnoha faktory, které mohly a pravděpodobně i způsobily určité nepřesnosti. Ať už se jedná o rušivé zdroje světla, či nedokonalý úhel záběru při pořizování fotografií a podobně. Jednalo se o první měření tohoto druhu, které mělo ověřit samotný postup měření a otázku, zdali je to možné. Výzkumný tým nemohl předpokládat veškeré události spojené s měřením, jsou tedy výsledky především orientačního charakteru a jejich vypovídající hodnota je zejména vklad do budoucna pro další měření. Ovšem další měření je možné opět až při plánované odstávce jaderné elektrárny, pokud se podaří vyjednat zhasnutí alespoň určitých zdrojů světelného záření v sále, což je ovlivněno bezpečnostními nařízeními.

Výsledky měření zcela neprokazují závislost střední hodnoty jasu na hodnotě vyhoření paliva. Je to způsobeno především nedokonalým snímáním jednotlivých palivových souborů. Dále z naměřených hodnot vyplývá, že palivové soubory umístěné po stranách bazénu mají menší hodnoty jasu. To je způsobeno tím, že intenzitu záření palivových kazet uprostřed ovlivňuje intenzita záření vedlejších palivových souborů. Z obr. 5-3 je také patrné, že větší intenzita záření je v prázdných pozicích, kde se záření odráží.

Pro další měření tohoto typu by bylo vhodné použít filtr, který upravuje spektrální citlivost fotoaparátu a docílit co největší tmy v reaktorovém sálu. Případně kalibrovat fotoaparát se softwarem pomocí externího zdroje. Při eliminování veškerých rušivých faktorů, lze uvažovat nad užitím tohoto typu měření, jako kontrolní měření pro inspektory, kteří kontrolují přítomnost paliva v bazénu vyhořelého paliva.



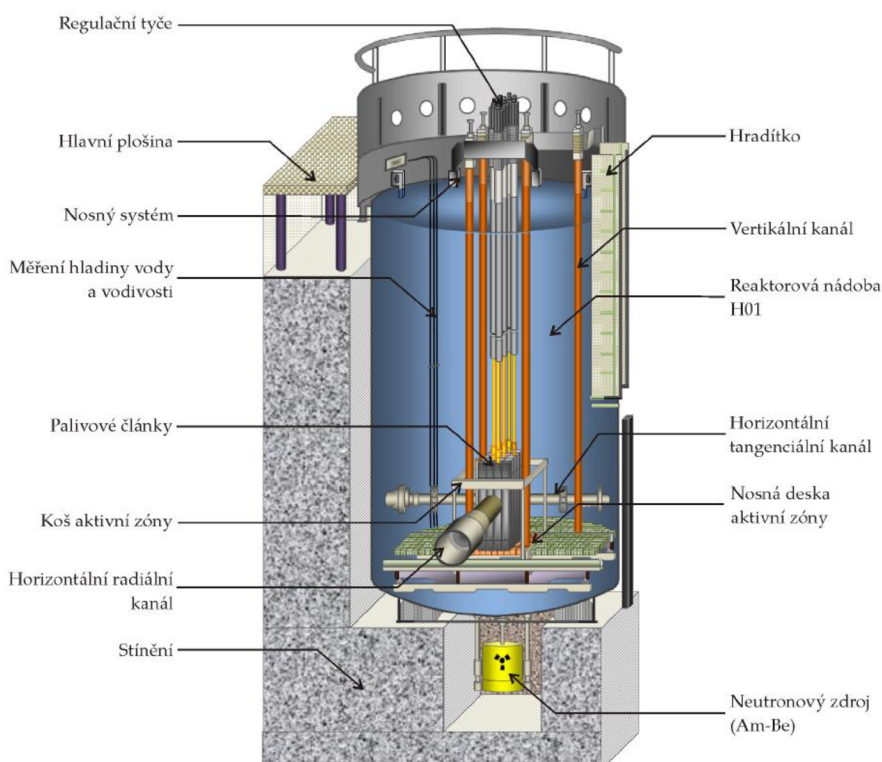
## 7 MĚŘENÍ NA ŠKOLNÍM REAKTORU VR-1

V únoru 2015 proběhlo na školním reaktoru VR-1 měření Čerenkovova záření, respektive jeho jasů v závislosti na výkonu reaktoru. Jas záření byl zaznamenáván na digitální fotografii pomocí digitálního zrcadlového fotoaparátu Nikon D7000. Vyhodnocení jasů bylo provedeno pomocí programu LumiDISP. Fotografie byly pořizovány v jednotlivých intervalech při zvyšování výkonu reaktoru. Druhá sada fotografií byla pořizována při rychlém odstavení reaktoru pádem regulačních tyčí.

### 7.1 Popis reaktoru

VR-1 je školní jaderný reaktor umístěný v objektu Matematicko-fyzikální fakulty UK v Praze. Jedná se o lehkovodní reaktor bazénového typu. Jako palivo je zde využíván obohacený uran  $^{235}\text{U}$  na 19,7 %, aby splňovalo mezinárodní úmluvu o snižování obohacení paliva. Palivo je umístěno mezi vrstvou hliníku. Palivové články mají průřez čtverce o šesti a osmi trubkách. Jako moderátor je zde používána demineralizovaná voda, která zároveň slouží jako biologická ochrana a zároveň jako chladivo. Protože reaktor má velmi malý výkon, postačuje dané množství vody jako přirozené chlazení aktivní zóny. Jmenovitý výkon reaktoru je 1 kW, krátkodobě až 5 kW. Teplota vody v bazénu s reaktorem je přibližně 20 °C, podle teploty okolí. K regulaci a ovládání reaktoru slouží 5 až 7 absorpčních kadmiových tyčí. Počet tyčí závisí na aktuálním sestavení aktivní zóny. Pohon tyčí je zajištěn pomocí krokového motoru. V případě nebezpečí je vyřazen elektromagneticky přidržovaný pastorek a tyč samovolně padá do aktivní zóny a dochází tak k odstavení reaktoru.

Samotný reaktor se skládá ze dvou bazénů, které jsou umístěny v betonovém osmistěnu. Obě nádoby jsou shodné, v jedné nádobě je umístěna aktivní zóna reaktoru. Druhá nádoba slouží k manipulaci, obě nádoby jsou propojeny a mohou být odděleny hradítkem. Detailnější popis nádoby s aktivní zónou je uveden na obrázku pod textem. [14]

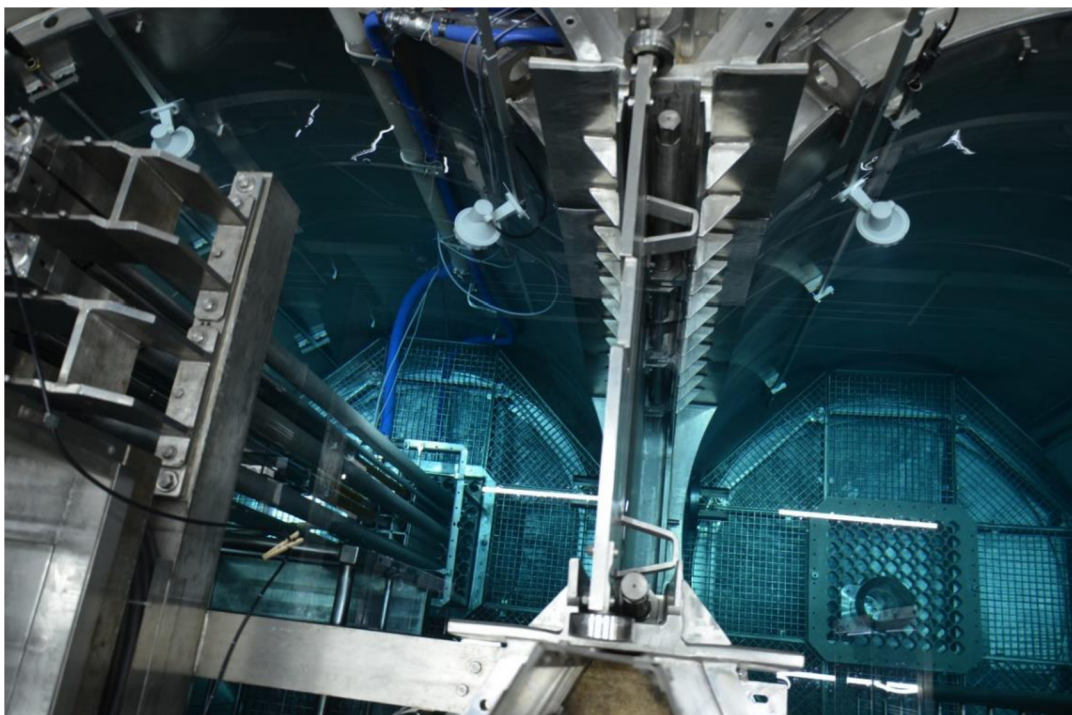


Obr. 7-1: Řez školním reaktorem VR-1[14]



Nádoby jsou vyrobeny z nerezového materiálu a mají průměr 2 300 mm, výška nádob je 4 720 mm. Tloušťka stěny nádob je 15 mm, dno nádoby má tloušťku 20 mm. Nad aktivní zónou je demineralizovaná voda, přibližně do výšky 3000 mm.

Reaktor je řízen z velínu, kde je umístěno ovládací zařízení reaktoru. Řízení reaktoru slouží především k zajištění bezpečnosti. Ochranný systém se skládá ze čtyř kanálů provozního měření a 4 kanálů nezávislé výkonové ochrany. V provozu jsou pouze 3 kanály, 4 kanál slouží jako záložní. K vyhodnocení slouží vždy dva kanály ze tří.



Obr. 7-2: Pohled na hradidlo mezi bazény reaktoru VR-1

## 7.2 Popis měření

Školní jaderný reaktor VR-1 vrabec byl pro měření zvolen, kvůli možnosti vypnout veškeré osvětlení reaktorového sálu. Ovšem jedna ze čtyř stěn reaktorového sálu je prosklena, tudíž měření probíhalo ve večerních hodinách, aby bylo možno dosáhnout co nejlepších podmínek pro měření. Laicky řečeno, měření vyžadovalo tmu, abychom mohli pozorovat namodralé Čerenkovovo záření.

Jak už v popisu reaktoru zaznělo, skládá se ze dvou bazénů. K okraji bazénu s aktivní zónou byl umístěn na stativ digitální zrcadlový fotoaparát Nikon D7000. Fotoaparát byl zaostřen na aktivní zónu reaktoru. Jakmile bylo vše připraveno, došlo k zhasnutí veškerých možných světelných zdrojů v reaktorovém sálu. Reaktor nabíhal z nulového výkonu, u výkonu reaktoru pohybujícího se kolem 1 kW bylo možné zaznamenat slabé Čerenkovovo záření. Od tohoto okamžiku začalo samotné měření a byly pořizovány fotografie vždy po zvýšení výkonu reaktoru o 1 kW až na maximální možnou hodnotu výkonu 5 kW, kterou je schopen reaktor poskytnout. Fotoaparát byl osazen filtrem, který potlačoval všechny barvy spektra, kromě modré složky.

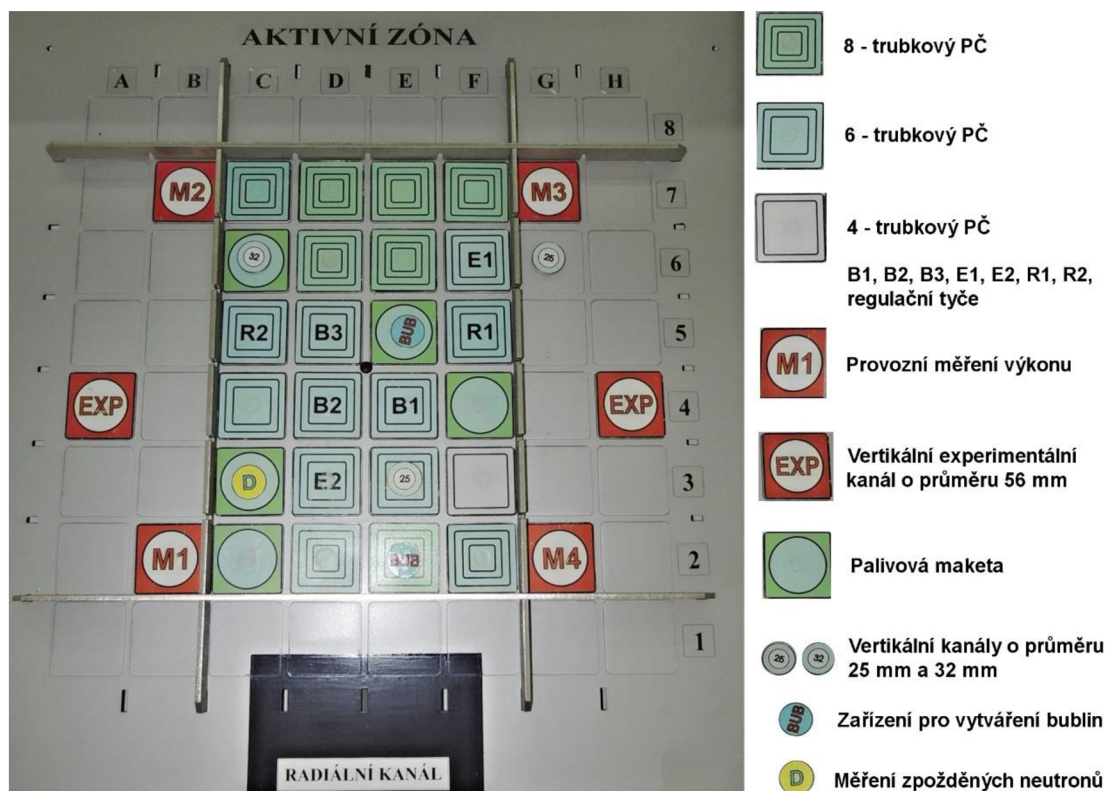


Obr. 7-3: Příprava experimentu na školním reaktoru VR-1

Po dosažení maximálního možného výkonu byl reaktor úmyslně odstaven havarijním spuštěním regulačních tyčí do aktivní zóny reaktoru. Výkon reaktoru exponenciálně klesal a přibližně každých 10 sekund byla pořízena fotografie s aktivní zónou, na které byl zaznamenán aktuální jas Čerenkovova záření. Při tomto druhém měření byl fotoaparát bez filtru upřednostňujícího modrou složku barevného spektra. Od začátku měření až po hodnotu 143 sekund byly fotografie pořizovány s ISO<sup>5</sup> 100, dále pak už byly fotografie pořizovány s hodnotou ISO 2000. Pořizování snímků aktivní zóny bylo ukončeno po 409 sekundách. Po této době už bylo Čerenkovovo záření vidět jen nepatrně.

---

<sup>5</sup> ISO neboli citlivost, je jeden z faktorů, který určuje expozici. Čím větší hodnota citlivosti je na fotoaparátu nastavena, tím menší je expoziční čas snímku. Při větší citlivosti je tedy potřeba méně dopadajícího světla. Zkrátíme-li expoziční čas, snížíme tím i rozmazání snímku. Ovšem s rostoucím ISO se zvyšuje i šum fotografie.



Externí zdroj neutronů je umístěn ve středu pod aktivní zónou jaderného reaktoru

Obr. 7-4: Uspořádání aktivní zóny reaktoru VR-1 při měření

Při měření byla aktivní zóna uspořádána dle obr. 6-2. Měření začínalo při následujících polohách regulačních tyčí a výkonu:

Tab. 7-1: Poloha regulačních tyčí před začátkem měření

Výkon	B1	B2	B3	E1	E2	R1	R2
0,2 W	682	681	682	571	0	420	580

Regulační tyče jsou poháněny krokovým motorem, kde hodnota 682 je krajní poloha tyče, která je plně zasunuta v aktivní zóně. Hodnota 0 značí, že regulační tyč je vytažena. Výkon reaktoru byl zvyšován vysunováním regulačních tyčí.

## 7.3 Zpracování naměřených hodnot

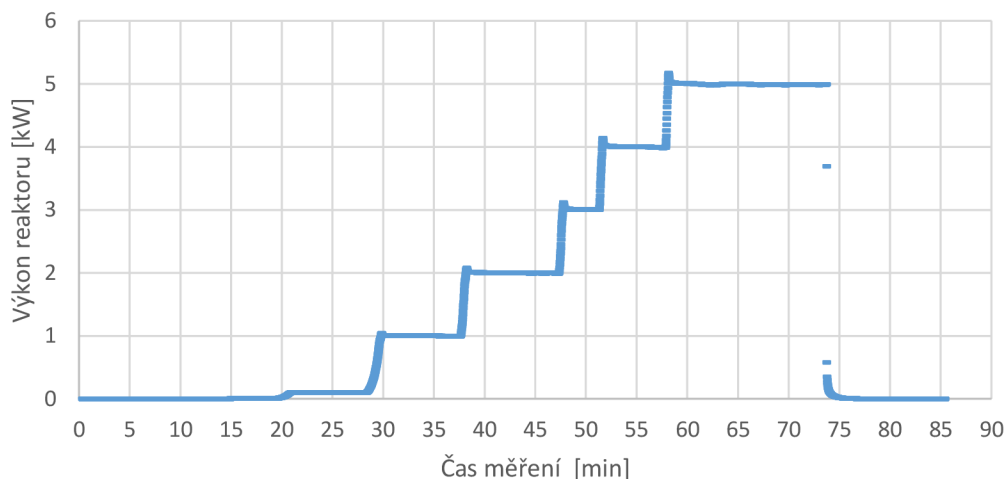
### 7.3.1 První měření

Jak již bylo zmíněno, při prvním měření byl postupně zvyšován výkon reaktoru až na 5 kW. Postupně byly pořizovány fotografie po kroku 1 kW. Fotoaparát Nikon D7000 byl umístěn na stativu na okraji bazénu s aktivní zónou. Fotoaparát Nikon D7000 byl zvolen proto, že byl kalibrován pro použití s programem LumiDISP.

Před samotným započítáním měření byl fotoaparát zaostřen na aktivní zónu, tak aby ji zabíral z nejlepšího možného úhlu. Poté bylo v reaktorovém sále zhasnuto. Začalo postupné zvyšování výkonu reaktoru. Výkon byl zvyšován po 1 kW, před každým pořízením snímku byla ponechána doba několika minut na ustálení výkonu.

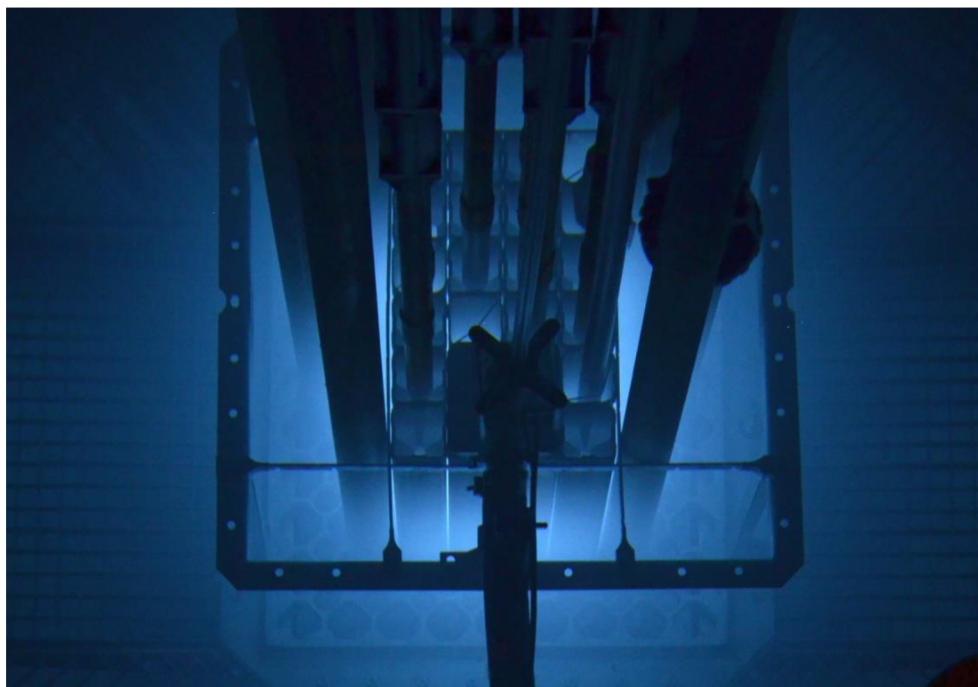


Časový záznam hodnot výkonu reaktoru měřených pomocí širokopásmých štěpných komor pro detekci neutronů



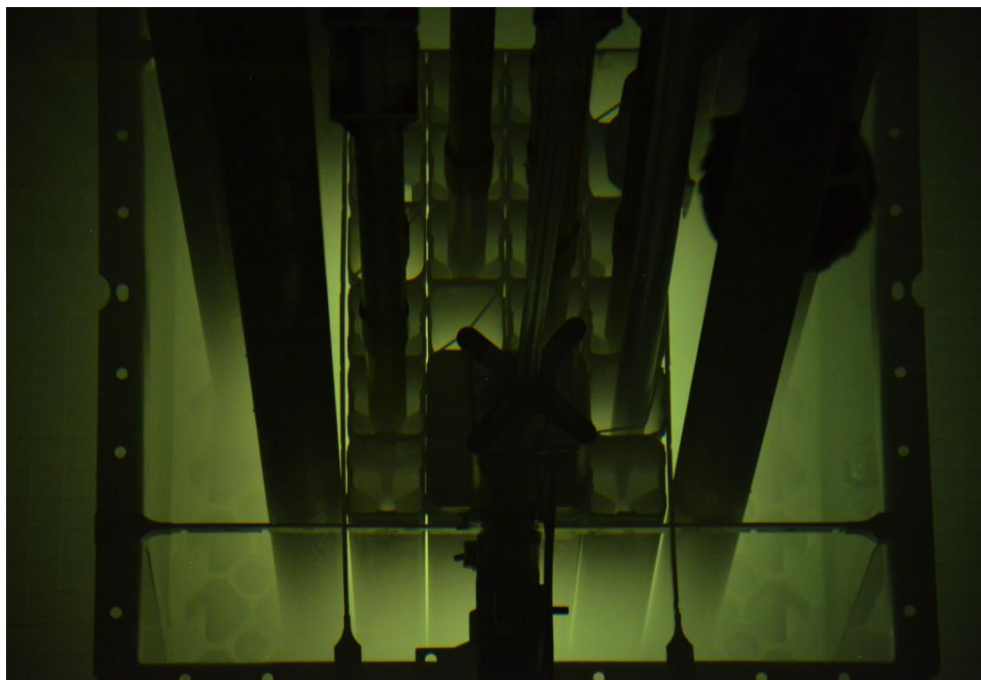
Obr. 7-5: Záznam změn výkonu během celého měření

Při měření jasu byla aktivní zóna brána jako celek. Nebyly měřeny jednotlivé palivové trubky. Jednak proto, že aktivní zóna je velmi malá a také proto, že nebylo možné fotit kolmo nad aktivní zónou. Jak je patrné z fotografie níže (obr. 6-4) a při porovnání s uspořádáním aktivní zóny je patrné, že větší intenzita Čerenkovova záření je spíše z prázdných palivových maket, než z palivových článků. Je to zejména kvůli konstrukci trubkových palivových článků a kvůli odrazům záření v nerezové konstrukci.



Obr. 7-6: Snímek Čerenkovova záření v aktivní zóně jaderného reaktoru VR-1

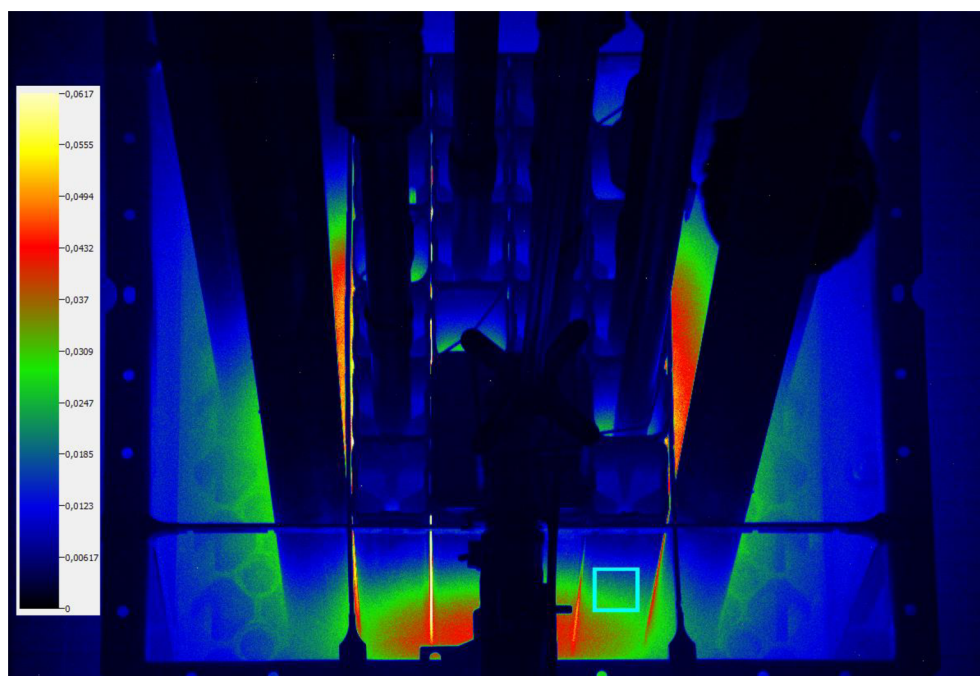
Při prvním měření byl použit navíc speciální filtr navržený a vyrobený pro tento fotoaparát (Nikon D7000), který upravuje spektrální citlivost fotoaparátu tak, aby odpovídala citlivosti lidského oka.



Obr. 7-7: Snímek Čerenkovova záření v aktivní zóně jaderného reaktoru VR-1 pořízený se speciálním filtrem.

Snímek pořízený přes filtr je mírně nazelenalý, takhle je zachycena modrá barva Čerenkovova záření lidským okem a v mozku následně přetvořena na podobu jakou vnímáme.

Pomocí programu LumiDISP byly následně pořízené snímky zanalyzovány a ke každému měřenému výkonu byla přiřazena střední hodnota jasu.



Obr. 7-8: Zobrazení aktivní zóny v programu LumiDISP s rozložením jasu, a se zvýrazněnou oblastí měření jasu.

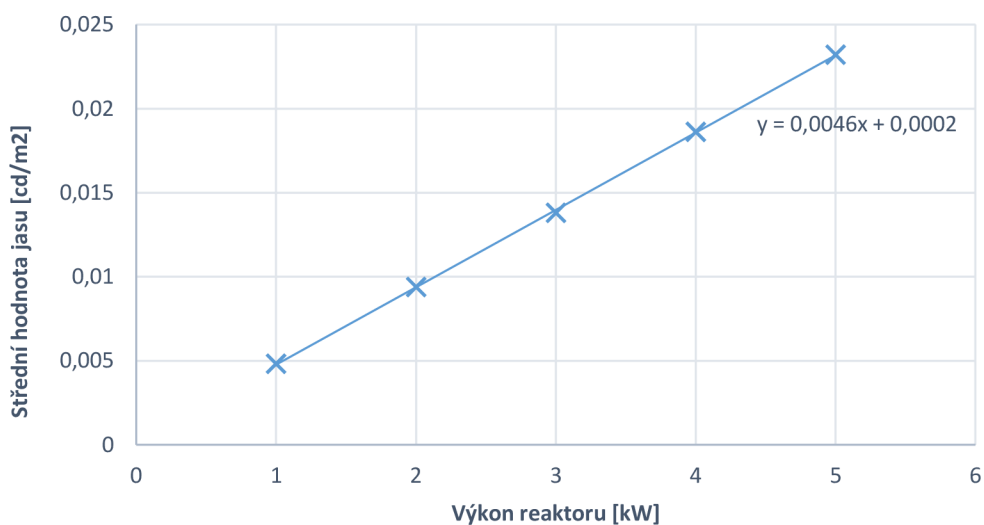
Pro měření jasu byla vybrána oblast 200 x 200 pixelů, kde je Čerenkovovo záření intenzivní a zároveň je homogenní. Výsledná hodnota jasu je tedy průměrná hodnota ze 40000 naměřených hodnot. Výsledná střední hodnota byla tedy přiřazena k danému výkonu reaktoru.

Tab. 7-2: Tabulka naměřených středních hodnot jasu v závislosti na rostoucím výkonu jaderného reaktoru. Nejistota měření je asi 10%, vychází z dílčích nejistot, jako je teplotní šum čipu, spektrální přizpůsobení snímače, vliv mechanických součástí fotoaparátu.

Výkon jaderného reaktoru [kW]	Střední hodnota jasu [cd.m <sup>-2</sup> ]
1	0,00482
2	0,00940
3	0,0138
4	0,0186
5	0,0232

Naměřené hodnoty jsou vyneseny v grafu. Soubor naměřených bodů v grafu je proložen přímkou – lineární regrese, která představuje aproximaci daných hodnot pomocí metody nejmenších čtverců. Odchyłka od proložené přímky je velmi malá.

### Závislost střední hodnoty jasu na rostoucím výkonu reaktoru VR-1



Obr. 7-9: Závislost střední hodnoty jasu v označené oblasti na výkonu

Střední hodnota jasu naměřená v označené oblasti roste s malou odchylkou lineárně s rostoucím výkonem.

### 7.3.2 Druhé měření

Druhá část měření spočívala v rychlém odstavení reaktoru. Konkrétně se jednalo o havarijní spuštění regulačních tyčí a okamžité zastavení provozu reaktoru. Po odstavení reaktoru začal výkon exponenciálně klesat spolu s intenzitou Čerenkovova záření. Měřená oblast je stejná jako v prvním měření.

Jak výkon postupně klesal, byly pořizovány v určitém časovém rozestupu fotografie aktivní zóny. Fotografie byly pořizovány bez speciálního filtru s úpravou spektrální citlivost fotoaparátu. Vzhledem k tomu, že veškeré hodnoty se relativně porovnávají, tak absolutní hodnoty nejsou nutné.

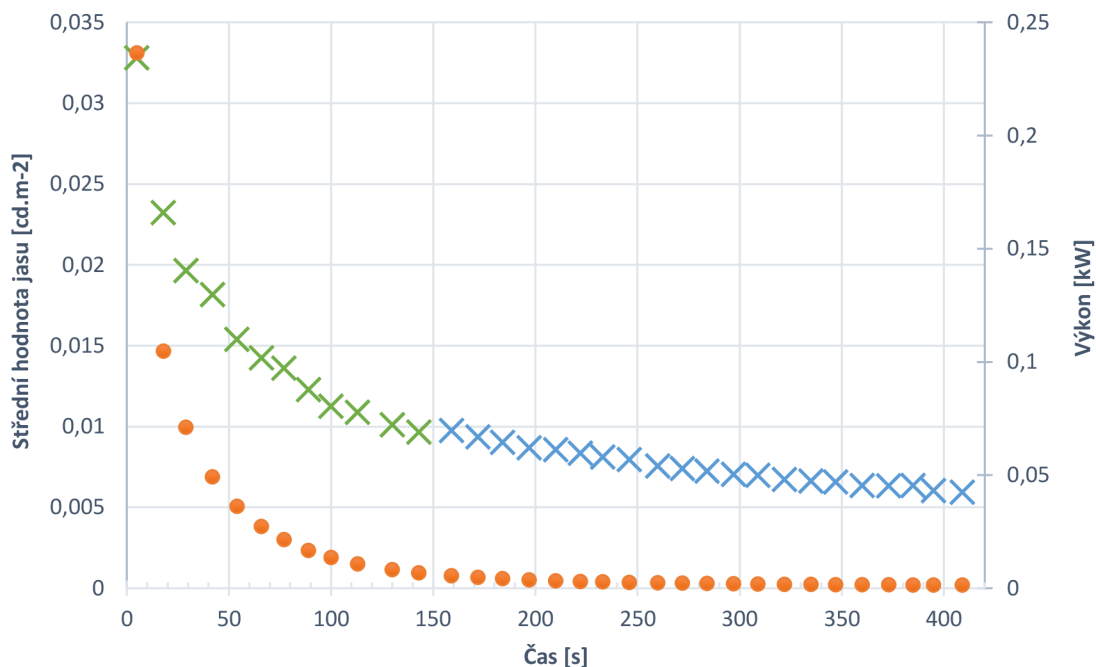
Prvních 143 sekund jsou snímky pořizovány s hodnotou ISO 100, poté už intenzita Čerenkovova záření klesla natolik, že prostředí bylo velmi tmavé. Proto byla hodnota ISO přenastavena na ISO 2000. To umožnilo pokračovat v měření, ale nelze tedy považovat hodnoty naměřené do 143 sekund a hodnoty naměřené od tohoto času za navazující. Dále se liší velikost šumu, kdy šum při ISO 2000 byl natolik velký, že šlo o hranici měřitelnosti. Poměr mezi získanými daty a šumem byl 1:10. Šum by bylo možné zredukovat použitím kvalitnějšího snímacího zařízení.

Tab. 7-3: Tabulka naměřených hodnot střední hodnoty jasu Čerenkovova záření při odstavení reaktoru při snímání s hodnotami ISO 100 a ISO 2000. Nejistota měření je asi 10%.

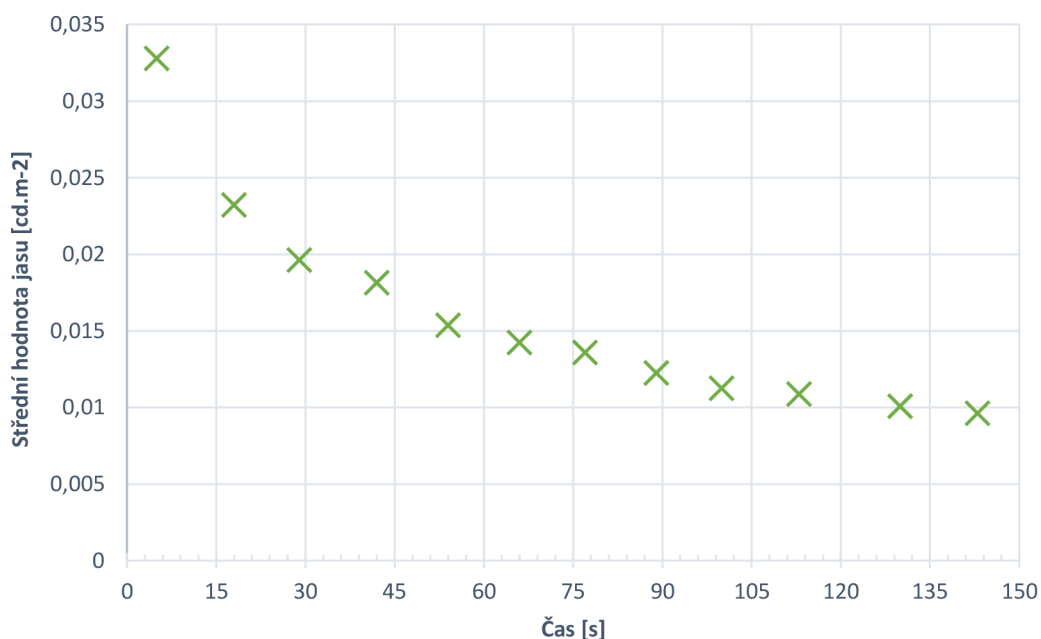
ISO 100		ISO 2000	
Čas [s]	Střední hodnota jasu [ $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ]	Čas [s]	Střední hodnota jasu [ $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
0	0,12876	159	0,00975
5	0,03280	172	0,00937
18	0,02323	184	0,00902
29	0,01965	197	0,00868
42	0,01815	210	0,00856
54	0,01538	222	0,00835
66	0,01425	233	0,00811
77	0,01360	246	0,00795
89	0,01227	260	0,00755
100	0,01125	272	0,00741
113	0,01088	284	0,00725
130	0,01010	297	0,00705
143	0,00964	309	0,00699
		322	0,00673
		335	0,00663
		347	0,00656
		360	0,00636
		373	0,00633
		385	0,00636
		395	0,00604
		409	0,00594

Na obrázku 6-8 je možné vidět grafické zpracování poklesu střední hodnoty jasu Čerenkovova záření při odstavení reaktoru. Mezi 143s a 159s je možné pozorovat skok, který je působen

rozdílnou hodnotou ISO při pořizování snímků z důvodů menší intenzity modrého záření. (odděleno barevně, zelená barva ISO 100, modrá barva ISO 2000) Pro lepší představu je v grafu též zobrazen pokles výkonu reaktoru, jenž klesá exponenciálně díky zpožděným neutronům.

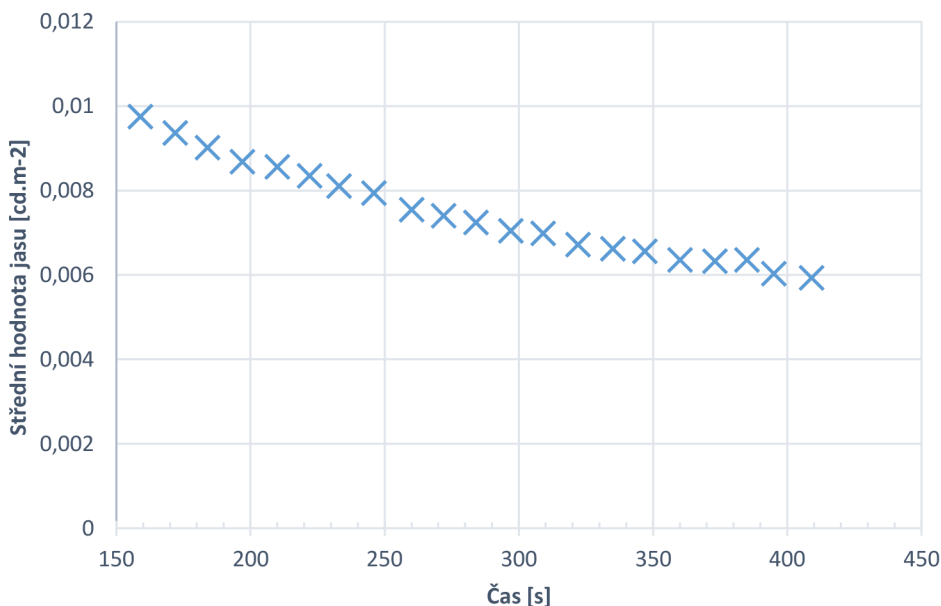


Obr. 7-10: Střední hodnoty jasu ve vyznačené oblasti při měření bez filtru. Měřeno od okamžiku odstavení až po mez měřitelnosti. Při ISO 100 (0s-143s) a ISO 2000 (159s-409s). Pro porovnání je zde vyznačen pokles výkonu v onom čase. (Oranžová barva, svislá osa vpravo)



Obr. 7-11: Detailnější pohled na pokles střední hodnoty jasu Čerenkovova záření ve vyznačené oblasti při měření bez filtru od okamžiku odstavení reaktoru po 143s měření při ISO 100





Obr. 7-12: Detailnější pohled na pokles střední hodnoty jasu Čerenkovova záření ve vyznačené oblasti při měření bez filtru od okamžiku 159s až po mez měřitelnosti, měření při ISO 2000

## 7.4 Použité přístroje

Jako záznamové zařízení byl použit digitální zrcadlový fotoaparát Nikon D7000 se snímačem CMOS APS-C 16,2 Mpx, s možností nastavení citlivosti ISO 100 až ISO 6400. S objektivem Nikon AF-S DX NIKKOR 18–105 mm (zoom) se světelností  $f/3,5-5,6G$  ED VR. Dále byl při prvním měření použit speciálně vyrobený filtr pro tento fotoaparát, který upravuje spektrální citlivost fotoaparátu tak, aby odpovídala citlivosti lidského oka. Fotoaparát byl umístěn na standartním stativu.



Obr. 7-13: Použitý zrcadlový fotoaparát Nikon D7000 [34]

Pořízené snímky byly zpracovány v programu LumiDISP verze 1.5.28, který představuje technologii pro fotometrické měření jasu a jeho distribuce. Více informací o tomto softwaru je uvedeno v kapitole 6.2 LumiDISP.

Pro měření skutečného výkonu reaktoru byl použit již zabudovaný systém čtyř širokopásmových štěpných komor RJ 1300 pro detekci neutronů.

## 7.5 Závěr měření

Měření na školním reaktoru VR-1 v Praze bylo teprve druhé měření pomocí fotoaparátu a softwaru LumiDISP. Ovšem naměřené výsledky zcela předčily očekávání. Závislost střední hodnoty jasu naměřené na aktivní zóně reaktoru na výkonu reaktoru je lineární. Při zvyšování výkonu reaktoru rostla i intenzita Čerenkovova záření. Předpokladem bylo, že závislost nebude tolik patrná, že tato závislost se projeví u vyšších výkonů, kterých tento reaktor není schopen dosáhnout. Ale především díky vypnutí všech světelných zdrojů v reaktorovém sálu, použití speciálního filtru upravujícího spektrální citlivost fotoaparátu a posuzování aktivní zóny jako celkového zdroje záření, bylo možné dosáhnout těchto naměřených výsledků. Jednotlivé palivové soubory nešly měřit samostatně z důvodu nepřístupné konstrukce aktivní zóny. Aktivní zóna byla brána jako celek a střední hodnota jasu byla měřena na čtverci 200x200 pixelů, kde byly hodnoty jasu homogenní.

Při prvním měření rostla střední hodnota jasu lineárně s rostoucím výkonu, jak ukazuje obr. 6-7. Je tomu tak, protože fotografie aktivní zóny byly pořizovány při ustálení výkonu reaktoru a v jednotném časovém intervalu. Intenzita Čerenkovova záření roste s výkonem, protože při zvyšování výkonu roste počet štěpných reakcí a tím pádem i počet elektronů, které způsobí vznik Čerenkovova záření.

Při druhém měření je patrné, že ihned po odstavení intenzita Čerenkovova záření exponenciálně klesá a kopíruje tak pokles výkonu reaktoru. Ovšem střední hodnota jasu je zde ovlivněna zpožděnými neutrony. Při tomto měření bylo nutné měnit nastavení hodnoty ISO na fotoaparátu, skok v naměřených hodnotách je dobře patrný na obr. 6-8. Nelze tedy brát naměřená data za konzistentní.

Nejistota při měření je přibližně 10 %, což je způsobeno kumulací dílčích nejistot, jako je teplotní šum čipu, spektrálním přizpůsobením snímače a vlivem mechanických součástí fotoaparátu, například clonou, závěrkou apod. Skutečnosti jako drobné nečistoty ve vodě bazénu jsou při zpracování výsledků zanedbány.

K průkaznějším závěrům je nezbytné provést ještě další měření závislosti střední hodnoty jasu na rostoucím výkonu reaktoru. Dále by bylo zajímavé ponechat výkon reaktoru na stabilní hodnotě a v časových rozestupech pořizovat snímky aktivní zóny a následně sledovat nárůst intenzity Čerenkovova záření díky přeměnám produktů štěpení. Vystává zde otázka, zda-li by měření bylo dostatečně přesné, aby bylo možné rozpoznat rozdíl mezi začátkem a koncem měření. Zajímavé by též bylo pořízení kalibračního zdroje světla, pro kalibraci.

## 7.6 Návrh na inovaci

Jak už bylo uvedeno v závěru z měření na jaderném reaktoru VR-1, tak by bylo vhodné vytvořit kalibrační světelný zdroj, který by byl využit před každým měřením pomocí fotoaparátu a programu LumiDISP. Jednalo by se o zdroj, který by byl sestaven z LED, a byl by vždy spouštěn do bazénu s aktivní zónou, aby bylo možné porovnávat měřené hodnoty s pevně danou hodnotou kalibračního zdroje. Tímto způsobem by se dalo předejít nahodilým chybám měření způsobenými nečistotami ve vodě.

## 8 ZÁVĚR

Využití jasové analýzy fotografií s Čerenkovovým zářením pomocí softwaru LumiDISP má velký potenciál pro využití v jaderné oblasti. Výhody tohoto měření jsou vysoká flexibilita a dále možnost použití běžně dostupného fotoaparátu, který bude kompatibilní se softwarem LumiDISP. To značně zmenšuje vynaložené finanční investice do měření. I přes to, že v současné době je systém měření stále ve vývoji, tak lze uvažovat o tom, že, fotoaparát a počítač, vybavený softwarem LumiDISP pro jasovou analýzu, by mohl být součástí vybavení inspektorů IAEA. Inspektoři by systém mohli využít při kontrole použitého paliva v bazénu vedle reaktoru, aby ověřili jeho stav, zdali nebylo odcizeno a neproběhla nějaká nenahlášená manipulace, a vše sedí s detailním plánem poskytnutým inspektorům. Po nastavení a kalibraci by inspektoři mohli pořídit snímky s přiřazením hodnot jasu k jednotlivým palivovým souborům, a díky tomu by měli být schopni stanovit vyhoření paliva, případně by také bylo možné odhalit nehomogenitu ve výkonu jednotlivých palivových kazet. Vzhledem k tomu, že IAEA má umístěné kamery v reaktorovém sále, které přenášejí aktuální informace do centrály do Vídně, tak se nabízí možnost instalovat automatické snímací zařízení do bazénu s použitým palivem, které by odesílalo fotky, které by bylo možné analyzovat až v centrále.

Další možné využití detekce jasu Čerenkovova záření je při monitorování nepředvídatelného zvýšení výkonu reaktoru. Kladnými aspekty, které hovoří ve prospěch detektoru, jsou velký rozsah měření a především to, že by se detektor nacházel ve větší vzdálenosti od aktivní zóny reaktoru a byl tak dostupný pro případné opravy nebo by se mohl vyhnout následkům případné nehody reaktoru, která by zničila neutronové detektory. Kombinaci fotoaparátu a softwaru na měření jasu by bylo možné také využít například při měření nerovnoměrnosti rozložení toků gama záření během provozu reaktoru. Snímky by bylo pořizováno v časových intervalech a vyhodnocení by muselo být zautomatizováno.

V rámci diplomové práce byly provedeny analýzy naměřených výsledků z jaderné elektrárny Dukovany. Konkrétněji se jednalo o využití měření střední hodnoty jasu Čerenkovova záření jednotlivých použitých palivových souborů, uložených v bazénu v reaktorovém sále, pro stanovení jejich vyhoření. Jednalo se o první měření tohoto typu a výsledky jednoznačně neprokázaly závislost mezi jasem a vyhořením. Avšak v práci jsou uvedena doporučení pro další měření, díky kterým by mohla být závislost mezi naměřeným jasem a vyhořením paliva průkazná. Jsou zde uvedeny též výsledky měření závislosti jasu Čerenkovova záření na rostoucím výkonu reaktoru. Na rozdíl od zmíněných experimentů, které využívali pro detekci záření fotonásobiče či fotodiody, tak střední hodnota jasu lineárně stoupala s rostoucím výkonem i při malých výkonech reaktoru. To je zřejmě způsobeno vlastnostmi fotodiód a fotonásobičů. Nedostatky při měření jasu Čerenkovova záření pomocí fotoaparátu byly především v nutnosti přizpůsobit měřenou oblast tak, aby výsledky měření nebyly ovlivněny dalšími zdroji světelného záření. Tomu lze částečně zabránit použitím polarizačních filtrů, filtrů pro separaci barev apod., které například eliminují odlesky od vodní hladiny a nerezových součástí reaktoru.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] JELLEY, J V. Čerenkov radiation and its applications. *British Journal of Applied Physics* [online]. 1955, vol. 6, issue 7, s. 227-232 [cit. 2015-05-22]. DOI: 10.1088/0508-3443/6/7/301.
- [2] HRUBÝ, Jiří. *Čerenkovov záření*. České Budějovice, 2002. Dostupné také z: <http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/Svadlenkova/Cerenkovovo%20zareni.pdf>. Akademická práce.
- [3] Nobel prize. *Pavel A. Cherenkov - Biographical* [online]. 2015 [cit. 2015-01-19]. Dostupné z: [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1958/cherenkov-bio.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1958/cherenkov-bio.html)
- [4] Biography.com. *Portrait of Marie Curie* [online]. 2015 [cit. 2015-01-19]. Dostupné z: <http://www.biography.com/people/marie-curie-9263538>
- [5] VÝÚKOVÝ WEB. Aldebaran. *Cerenkov* [online]. 2015 [cit. 2015-01-19]. Dostupné z: [http://www.aldebaran.cz/famous/photos/Cerenkov\\_01.jpg](http://www.aldebaran.cz/famous/photos/Cerenkov_01.jpg)
- [6] FUKÁTKO, Tomáš. *Detekce a měření různých druhů záření*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2007, 189 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 978-80-7300-193-3.
- [7] ULLMANN, Vojtěch. Astronukleární fyzika: Jaderná a radiační fyzika. *Čerenkovovo záření* [online]. 2015 [cit. 2015-01-19]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika6.htm#CerenkovZareni>
- [8] JOSEF GERNDT, Petr Průša. *Detektory ionizujícího záření*. 2., přeprac. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011, s. 126-129. ISBN 9788001047101.
- [9] ULLMANN, Vojtěch. Astronukleární fyzika: Detekce a spektrometrie ionizujícího záření. *Čerenkovovy detektory* [online]. 2015 [cit. 2015-01-19]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm#4>
- [10] ŠTEFÁNIKOVA HVĚZDÁRNA. *Kosmické záření* [online]. 2015 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://observatory.cz/static/vystavy/castice/1-zareni.php>
- [11] REICHEL, Jaroslav. ENCYKLOPEDIE FYZIKY. *Fotonásobič* [online]. 2015 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/747-fotonasobic>
- [12] Encyklopedie fyziky. *CCD - základní princip* [online]. 2015 [cit. 2015-01-19]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/748-ccd-zakladni-princip>
- [13] MATĚJŮ, Iveta. Detekce Čerenkovova záření na reaktoru VR-1. Praha: ČVUT, FJFI, Katedra jaderných reaktorů, 2013. 91 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Rataj Ph.D.
- [14] LumiDISP. *Aplikace* [online]. 2015 [cit. 2015-01-19]. Dostupné z: <http://www.lumidisp.eu/?section=about>
- [15] BURTON, Gordon, E. Michael ATTAS, Lars HILDINGSON, Oliver TREPTE a Gary J. YOUNG. *A nuclear fuel verification system using digital imaging of Cherenkov light*. Stockholm, Sweden, 1996. Vědecká práce.

- [16] FURIAN, Peter H. DREAMSTIME.COM. *Nuclear Fission Of Uranium* [online]. 2015 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://www.dreamstime.com/stock-photography-nuclear-fission-uranium-illustration-radioactive-decay-process-nucleus-atom-splits-smaller-isotopes-krypton-image32590252>
- [17] PORGER, K.G, R. GOLD a W.C. CORWIN. *Reactor power monitor based on Cherenkov radiation detection*, *IEEE Transactions on Nuclear Science NS17/1*. Illinois, 1970. Vědecká práce.
- [18] CHILADZE, Badri, Nodar LOMIDZE, Mikhail NIORADZE, Alexandr SIDELNIKOV a Igor TREKOV. *Application of Cherenkov Effect to Increase the Safety of Nuclear Plants*. Tbilisi, 2012. Bulletin of the Georgian national academy of science.
- [19] RIPPON, S.E. *An assessment of Cherenkov detectors as fission product monitors in water cooled reactors*. Aldermaston, 1962. Vědecká práce.
- [20] ARKANI, a GHARIB. Reactor core power measurement using Cherenkov radiation and its application in Tehran Research Reactor. *Annals of Nuclear Energy*. New York: Pergamon Press, 2009, **36**(7): 896-900. DOI: 10.1016/j.anucene.2009.03.009. ISSN 03064549. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306454909001005>
- [21] ARKANI, M. a M. GHARIB. Residual heat estimation by using Cherenkov radiation in Tehran Research Reactor. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2008, **596**(3): 417-421. DOI: 10.1016/j.nima.2008.08.071. ISSN 01689002. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900208011686>
- [22] MICHAEL ATTAS, E, Gordon R BURTON, J DENNIS CHEN, Gary J YOUNG, Lars HILDINGSSON a Oliver TREPTE. A nuclear fuel verification system using digital imaging of Cherenkov light. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 1997, **384**(2-3): 522-530. DOI: 10.1016/S0168-9002(96)00937-0. ISSN 01689002. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900296009370>
- [23] GRAPE, Sophie, Staffan JACOBSSON SVÄRD a Bo LINDBERG. Verifying nuclear fuel assemblies in wet storages on a partial defect level: A software simulation tool for evaluating the capabilities of the Digital Cherenkov Viewing Device. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2013, **698**: 66-71. DOI: 10.1016/j.nima.2012.09.048. ISSN 01689002. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900212011059>
- [24] MATĚJKA, Karel. *Vyhořelé jaderné palivo*. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 1996, 145 s. ISBN 80-707-8352-4.
- [25] *Nuclear security systems and measures for the detection of nuclear and other radioactive material out of regulatory control: implementing guide*. Vienna: IAEA, 2013. ISBN 978-920-1429-100.
- [26] *International Atomic Energy Agency: Equipment Used in Safeguards* [online]. 2015 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/newscenter/multimedia/photoessays/equipment-used-safeguards>

- [27] ULLMANN, Vojtěch. Astronukleární fyzika: Ionizující záření. *Detekce a spektrometrie kosmického záření* [online]. 2015 [cit. 2015-01-19]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika6.htm#KosmZareniDetekce>
- [28] EJFC. Observatoř Pierra Augera. *Experimentální jaderná a částicová fyzika* [online]. 2013 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://www.ejcf.cz/dalsi-skupiny/observator-pierre-auger>
- [29] GRYGAR, Jiří. *Česká astronomická společnost: Projekt Pierre Auger Observatory* [online]. 2003 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://www.astro.cz/clanky/ostatni/projekt-pierre-auger-observatory.html>
- [30] KAMIOKA OBSERVATORY. *Super-Kamiokande: Detection Principle* [online]. 2007 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/detector/howtodetect-e.html>
- [31] GRAPE, Sophie. *Statistical grounds for determining the ability to detect partial defects using the Digital Cherenkov Viewing Device*. Uppsala, 2010. Vědecká práce.
- [32] CHEN, J.D., D.A. PARCEY a R. KOSIERB. IAEA. *Detection of Partial Defects using a Digital Cerenkov Viewing Device* [pdf]. 2014 [cit. 2015-05-22].
- [33] CHEN, J.D., D.A. PARCEY a R. KOSIERB. IAEA. *Partial defect detection in LWR spent fuel using a digital cerenkov viewing device* [pdf]. 0014n. 1. [cit. 2015-05-22].
- [34] *FotoŠkoda: NIKON D7000* [online]. 2015 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://www.fotoskoda.cz/nikon-d7000-18105-afs-dx-vr/>
- [35] ČEZ. *Technologie a bezpečnost: Dukovany* [online]. 2014 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/edu/technologie-a-zabezpeceni.html#p1>

## PŘÍLOHA

Tab. 0-1 Tabulka získaných hodnoty z měření na EDU 2014. Hodnoty jsou řazeny podle obohacení a podle vyhoření paliva, ke každému měřenému palivovému souboru je přiřazen jas.

Obohacení [%]	Doba chlazení [rok]	Vyhoření [MWd/t]	Jas [ $10^{-3} \cdot \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ]	Obohacení [%]	Doba chlazení [rok]	Vyhoření [MWd/t]	Jas [ $10^{-3} \cdot \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
3,82	7,78	45339	5,1	4,38	0,84	41372	4,2
3,82	7,78	45339	6,7	4,38	6,88	44846	4,2
3,82	6,88	45616	4	4,38	6,88	45184	4
3,82	1,93	48074	6,5	4,38	6,88	45396	5,4
3,82	1,93	48074	7,7	4,38	6,88	45616	4
3,82	1,93	48074	11,2	4,38	6,88	45616	4,5
3,82	5,9	49988	4	4,38	6,88	45671	4,4
3,82	2,85	50034	5,3	4,38	6,88	46138	4,2
3,82	2,85	50034	5,5	4,38	6,88	46138	4,1
3,82	2,85	50051	4,9	4,38	6,88	46138	4,9
3,82	5,9	51199	3,2	4,38	4,8	46154	7,1
3,82	5,9	51199	3,6	4,38	4,8	46154	6,2
3,82	5,9	51231	3,7	4,38	6,88	46202	4,1
3,82	3,79	51254	5,5	4,38	6,88	46202	4,3
3,82	3,79	51265	4,5	4,38	4,8	46314	4,9
3,82	3,79	51265	5,2	4,38	2,85	47309	7,9
3,82	3,79	51265	6	4,38	2,85	47309	7,8
3,82	5,9	51356	5,2	4,38	2,85	47309	8,3
3,82	3,79	51515	5,5	4,38	1,93	49938	5,7
3,82	3,79	51864	4,6	4,38	1,93	49938	5,8
3,82	3,79	51864	4,8	4,38	1,93	50519	5,7
3,82	3,79	51942	4,1	4,38	1,93	50519	5,3
3,82	3,79	51942	4,6	4,38	1,93	50519	6,2
3,82	3,79	51964	3,8	4,38	2,85	50963	5
3,82	5,9	56338	4,5	4,38	2,85	50963	5,9
3,82	5,9	56338	5,2	4,38	2,85	50963	6,5
4,25	0,84	49870	5,6	4,38	2,85	50993	4,9
4,25	0,84	49946	4,1	4,38	2,85	50993	5,7
				4,38	2,85	50993	5,8
				4,38	1,93	51035	5,3
				4,38	1,93	51035	5,7
				4,38	1,93	51508	6,4
				4,38	1,93	51508	6,2
				4,38	1,93	51508	6
				4,38	3,79	51545	5,7
				4,38	3,79	51545	6,5
				4,38	2,85	51978	4,6
				4,38	2,85	51978	5,3