



Zdravotně  
sociální fakulta  
Faculty of Health  
and Social Studies

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

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Zdravotně sociální fakulta

Katedra laboratorních metod a informačních systémů

Diplomová práce

Měření fotonů pomocí elektronických  
dozimetrů při urychlování nabitých částic  
na Fyzikálním ústavu AV ČR v Praze

Vypracovala: Bc. Jana Židková

Vedoucí práce: Ing. Jan Singer CSc.

České Budějovice 2014

# Abstrakt

## Měření fotonů pomocí elektronických dozimetrů při urychlování nabitých částic na Fyzikálním ústavu AV ČR v Praze

Diplomová práce je zaměřena na shrnutí současné problematiky práce s experimentálními lasery v Badatelském centru Prague asterix laser systém (PALS), které spadá pod Fyzikální ústav AV ČR a Ústav fyziky plazmatu AV ČR.

Experimentální lasery slouží pro experimentální výzkum v oboru výkonných laserů a fyziky laserem vytvářeného plazmatu. Hlavním experimentálním zařízením Centra PALS je výkonný pulsní laserový systém Asterix IV, který Badatelské centrum PALS zakoupilo od německého Ústavu Maxe Plancka pro kvadratickou optiku v Garchingu u Mnichova (MPQ) za symbolickou 1 marku. Asterix IV patří mezi tři největší jódové lasery v Evropě.

Předchůdce Asterixe IV, byl 60 gigawattový jódový fotodisociační Asterix III, vytvořený v Německu již v roce 1975, o dva roky později byl v Sovětském svazu uveden do provozu 300 gigawattový jódový laser. Lasery nejprve sloužily pro výzkum termojaderné reakce, poté se ukázalo, že jejich výkon zdaleka nestačí pro zapálení termojaderné reakce, ale že mají praktické využití mimo rámec termojaderných aplikací.

Mezi výzkumné programy probíhající na experimentálních laserech patří vývoj aplikace plazmových bodových zdrojů měkkého nekoherentního záření, vývoj a aplikace plazmových rentgenových laserů atd.

Dalším zařízením nacházejícím se v Badatelském centru PALS patří laserový systém Ti – Sapphire o výkonu 25 terawattů. Na tomto systému byl proveden obdobný experiment měření fotonů filmovými dozimetry. Na experimentálním laseru Asterix IV v Badatelském centru PALS nebyl dosud provedený žádný experiment s filmovými ani s elektronickými dozimetry.

Tato práce se zabývá možností využití elektronických osobních dozimetrů při práci s lasery a zjištěním citlivosti těchto dozimetrů na rozdíl od jiných typů osobních

dozimetrů. Tohoto cíle bylo dosaženo měřeními na dvou na sobě nezávislých experimentech probíhajících na laserovém systému Asterix IV.

Možnosti využití elektronických osobních dozimetrů pro měření v pulzním poli, přestože jsou navrženy pro měření dávek pouze v kontinuálním poli, je důležité především pro pracovníky nově budovaného centra Extreme Light Infrastructure v Praze (ELI). Centrum ELI bude jedno z nejmodernějších laserových zařízení na světě. V něm budou prováděny výzkumné a aplikační projekty zahrnující interakci světla s hmotou na intenzitě, která je asi 10 krát větší než současně dosažitelné hodnoty. ELI bude dodávat ultrakrátké laserové pulsy trvající typicky několik femtosekund (10-15 fs) a produkovat výkon až 10 picowattu.

V Centru ELI bude na rozdíl od Centra PALS kontrolované pásmo, ve kterém je důležité monitorování zevního ozáření pracovníků. Proto si diplomová práce dává za cíl podpořit měřeními na PALSu využití elektronických osobních dozimetrů v Centru ELI. Dalším cílem mé práce bude porovnat citlivost nejpoužívanějších typů osobních dozimetrů jako jsou filmové a termoluminiscenční dozimetry.

V teoretické části je uveden popis a princip laseru Asterix IV. Dále pak definování ionizujícího záření a jeho druhů. V diplomové práci nechybí také vymezení pojmů jako je dozimetrie, typy dozimetrů, monitorování, radiační ochrana a veličiny s ní související.

V metodice jsou rozebrána měření, která byla uskutečněna v rámci dvou experimentů za pomoci elektronických osobních dozimetrů, filmových dozimetrů a termoluminiscenčních dozimetrů. Metodika je dále zaměřena na popis rozmístění laserového systému, především pak na popis interakční haly a interakčních komor, na kterých bylo prováděno měření. V metodice se nachází i řada fotografií vyfocených na pracovišti PALS pro snadnější orientaci.

Ve výsledcích jsou hodnoty z jednotlivých měření zaneseny pro lepší přehlednost do tabulek. Diskuse je zaměřena především na potvrzení hypotéz. Jsou zde porovnány výsledky z elektronických, filmových dozimetrů a termoluminiscenčních dozimetrů. Výsledky jsou vztaženy na jeden výstřel a statisticky zpracovány.

V případě celkového shrnutí práce je doporučeno používání elektronických osobních dozimetrů pro práci s experimentálními lasery a podpořen záměr využívání elektronických osobních dozimetrů v nově zbudovaném Centru ELI v Praze, zejména z důvodu vyšší citlivosti než jaká je u filmových a termoluminiscenčních dozimetrů a také pro snadnější, rychlejší a ekonomičtější vyhodnocení dávek.

**Klíčová slova:**

Prague asterix laser systém (PALS), elektronický dozimetr, filmový dozimetr, termoluminiscenční dozimetr, fotony, radiační ochrana

# **Abstract**

## **Measurement of photons via electronic dosimeters during the acceleration of charged particles at the Institute of Physics ASCR in Prague**

The thesis is focused on summarizing the current issue of work with experimental lasers in the research center of Prague Asterix Laser System (PALS), which falls under the Institute of Physics and Institute of Plasma Physics.

Experimental lasers used for experimental research in the field of powerful laser physics and laser-produced plasma. The main experimental facility PALS is a powerful pulsed laser system Asterix IV., The research center was purchased from the German Max Planck Institute for quadratic Optics in Garching near Munich for a symbolic 1 mark. Asterix is one of the three largest iodine lasers in Europe.

Preceded Asterix IV was 60 gigawatt iodine photodissociation Asterix III was created in Germany in 1975, two years later, the Soviet Union put into operation 300 gigawatt iodine laser. Lasers were used initially for research thermonuclear reaction, then it turned out that the laser power is not nearly enough to ignite thermonuclear reactions, but have practical utilized outside of thermonuclear applications. Between the research programs being carried out on the experimental development of lasers include applications of plasma point sources of soft non-coherent radiation, development and application of laser plasma X-ray etc.

Other facilities located in the research center include PALS laser system Ti - Sapphire power of 25 terawatts. In this system, a similar experiment was performed measuring photon film dosimeters. The experimental laser Asterix IV in the research center PALS have been no experiment with film or electronic dosimeters.

This work deals with the possibility of using electronic personal dosimeters when working with lasers and detection sensitivity of the dosimeters, unlike other types of personal dosimeters. This was achieved by measuring the two independent measurements ongoing at the Asterix IV laser system.

Possibilities of using electronic personal dosimeters for measuring the pulse field, even though they are designed to measure benefits only in the continuous field is particularly important for workers newly built ELI center in Prague. Center ELI will be the most modern laser equipment in the world. In it will be carried out the research and application projects involving the interaction of light with matter in intensity, which is about 10 times larger than the currently achievable. ELI will deliver ultrashort laser pulses lasting typically a few femtoseconds (10-15 fs) and produce power up to 10 PW.

The ELI Center will be unlike PALS controlled area in which it is important to monitor external radiation workers. Therefore, the thesis is aimed at providing support for PALS measurement using electronic personal dosimeters Center ELI. We also compare the sensitivity of the most common types of personal dosimeters such as film and thermoluminescent dosimeters.

In the theoretical part of the description and principle of laser Asterix IV. Furthermore, the definition of ionizing radiation and its species with a particular focus on gamma and X-rays. In this thesis remains missing definitions such as dosimetry, types of dosimeters, monitoring, radiation protection and value to it.

In the methodology are then analyzed measurements that were carried out in two experiments using electronic personal dosimeters, film dosimeters and thermoluminescent dosimeters. Furthermore, also the deployment of the laser system, focusing mainly on the description of the interaction of the hall and the interaction chamber, where were measured. The methodology is also a series of photos of photos taken at the workplace PALS for easier orientation.

In the results, the values of individual measurements recorded for better clarity in the tables and charts described.

The discussion is focused on the confirmation of hypotheses. Are compared to results from electronic and film dosimeters and electronic dosimeters and termoluminescent. Results are based on one shot and statistically processed.

In the event of a general summary of the work, it is recommended the use of electronic personal dosimeters to work with experimental lasers and supported the intention of the use of electronic personal dosimeters in the newly built Center ELI in Prague, mainly because of higher sensitivity than that with film and TLD and also for easier, faster, and economical evaluation of the benefits.

**Keywords:**

Prague Asterix Laser System (PALS), electronic dosimeter, film dosimeter, thermoluminescent dosimeter, photons, radiation protection

## **Prohlášení**

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

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

V Českých Budějovicích dne 11.8.2014

.....

Jana Židková



## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala zejména vedoucímu diplomové práce panu Ing. Janu Singerovi, CSc. za vedení práce, cenné rady a připomínky. Dále bych ráda poděkovala paní Ing. Olšovcové, Ph.D, za zprostředkování měření a pomoc při vyhodnocení výsledků. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat panu Pisarczykovi a RNDr. Krásovi, CSc. za možnost měření při jejich experimentech.

# Obsah

Úvod.....	13
1. TEORETICKÁ ČÁST .....	14
1.1 Současný stav dané problematiky.....	14
1.2 Prague Asterix Laser Systém.....	15
1.2.1 Laser.....	16
1.2.2 Historie experimentálních laserů .....	20
1.3 Ionizující záření .....	21
1.3.1 Druhy ionizujícího záření .....	21
1.3.2 Účinky ionizujícího záření.....	23
1.4 Dozimetrie .....	26
1.4.1 Zdroje ionizujícího záření.....	26
1.4.2 Pole ionizujícího záření .....	28
1.4.3 Interakce ionizujícího záření.....	28
1.5. Osobní monitorování .....	29
1.5.1 Monitorování zevního ozáření osob .....	29
1.5.2 Dozimetr .....	30
1.6 Radiační ochrana.....	34
1.6.1 Veličiny radiační ochrany.....	34
2. HYPOTÉZA A METODIKA VÝZKUMU .....	38
2.1 Hypotéza .....	38
2.2 Metodika výzkumu .....	38
2.2.1 Charakteristika použitých dozimetrů .....	39

2.2.2 Charakteristika použitého laseru.....	44
2.2.3 Rozmístění dozimetrů.....	49
2.2.4 Vyhodnocení dávky.....	54
2.2.5 Zpracování výsledků.....	56
3. VÝSLEDKY.....	58
4. DISKUSE.....	69
5. ZÁVĚR.....	83
6. SEZNAM INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	85
7. SEZNAM TABULEK.....	92
8. SEZNAM OBRÁZKŮ.....	94
9. PŘÍLOHY.....	95

## Seznam použitých zkratek

ANO	Akutní nemoc z ozáření
AV ČR	Akademie věd České republiky
ČR	Česká republika
CSOD	Celostátní služba osobní dozimetrie
ČSAV	Československá akademie věd
ED	Elektronický dozimetr
ELI	Extreme Light Infrastructure
EPQ	Max Planck Institute of Quantum Optics
EU	Evropská unie
FD	Filmový dozimetr
FZÚ	Fyzikální ústav
ICRP	International Commission on Radiological Protection
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements
IZ	Ionizující záření
MZ	Ministerstvo zahraničí
PALS	Prague Asterix Laser System
TLD	Termoluminiscenční dozimetry
tzv.	takzvaně
tzn.	to znamená
UV záření	Ultrafialové záření (ultra-violet)

## Úvod

Urychlovače částic se řadí do skupiny elektronických zdrojů ionizujícího záření. Mezi tyto urychlovače nabitých částic řadíme experimentální lasery, které se používají zejména pro výzkumy ve fyzice částic. Jeden ze tří největších experimentálních laserů v Evropě vlastní Fyzikální ústav AV ČR. Tento obří jódový laser nese název ASTERIX IV neboli Prague Asterix laser systém (PALS).

V současné době se při práci s experimentálními lasery v Badatelském centru PALS nevyužívá žádný typ osobních dozimetrů. Není to nutné, protože laserový systém nedosahuje tak vysokých hodnot dávek záření jako tomu bude například v nově budovaném centru ELI (Extreme Light Infrastructure). V ELI se počítá s vymezením kontrolovaného pásma. Zaměstnanci ELI budou povinni nosit osobní dozimetr na referenčním místě pro monitorování zevního ozáření osob. Díky cenové dostupnosti a nízkým provozním nákladům se doporučuje pro nově zbudované centrum použití právě elektronických osobních dozimetrů.

Elektronické osobní dozimetry jsou v dnešní době nejrozšířenějším a nejpoužívanějším typem osobního dozimetru v České republice. Využívají se jak v průmyslu, tak i v medicíně. Z tohoto důvodu byly také navrženy pro měření zejména kontinuálního pole. V pulzním poli, které generují právě experimentální lasery, nebyly dosud příliš používány. Elektronické dozimetry mají řadu výhod, které je řadí do popředí v typech osobních dozimetrů. Zejména je to vysoká citlivost (asi od 1  $\mu\text{Sv}$ ), okamžitá informace o získané dávce nebo dávkovém příkonu, možnost nastavení alarmu pro nastavitelnou referenční úroveň, absence procesu složitého a časově náročného vyhodnocování a vyvolávání.

Diplomová práce si dává za cíl zjistit možnosti využití elektronického osobního dozimetru typu DMC 2000 XB při práci s experimentálními lasery. Dále také porovnání použití s filmovým osobním dozimetrem a termoluminiscenčním dozimetrem. Tohoto cíle bylo docíleno po absolvování měření na dvou experimentech. Tyto experimenty proběhly na Fyzikálním ústavě AV ČR v Praze v Badatelském centru PALS.

# 1. TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 Současný stav dané problematiky

V současné době proběhlo obdobné měření možných radiologických rizik na laserovém systému, jenž generuje ultrakrátké intenzivní pulzy. Toto měření a vyhodnocení prováděl tým Ing. Olšovcové, PhD. z Fyzikálního ústavu AV ČR.

Při experimentu byly zkoumány možnosti stínění interakční haly, v níž jsou umístěna terčová zařízení a za druhé reakce typických osobních dozimetrů (filmů, TLD a elektronických osobních dozimetrů).

Měření bylo provedeno na Ti – Sapphire 25 TW laserovém systému.

Při měření byly osobní dozimetry rozmístěny v interakční hale, některé byly umístěny do komory i do místnosti, kde působí operátor, tzv. velín.

Dávky naměřené v interakční komoře byly velmi vysoké, až desítky mSv za výstřel ve směru paprsku. Naštěstí 1cm silná ocelová stěna komory představuje velmi dobrou ochranu pro oba elektrony a sekundární fotony. Z toho důvodu jsou dávky mimo komoru o několik řádu nižší. Přesto v době laserového provozu je zákaz vstupu do experimentální haly. Při experimentu bylo zjištěno, že část částic se uvolňuje a proniká dřevěnými dveřmi do velínu. Tyto dávky jsou nízké a nepředstavují žádné radiologické riziko pro zaměstnance.

Výpočty provedené na Ti-Sapphire laser dokazují, že v režimu produkujícím 100 MeV (6, 106 elektronů/výstřel, 240 výstřelů/den) nepředstavuje žádné zdravotní riziko pro zaměstnance ani pro veřejnost. Ale zákaz vstupu do experimentálního sálu během laserové operace je velmi důležitý. Doporučuje se počkat 10-15 minut před zahájením práce s komorami. Pro pracovní režim není doporučeno žádné dodatečné stínění.

Experimentem se dále potvrdila spolehlivost osobních dozimetrů, protože použité dozimetry byly původně navrženy pro měření v kontinuálním elektromagnetickém poli. Lasery totiž generují pulzní elektromagnetické pole.<sup>[1]</sup>

## 1.2 Prague Asterix Laser Systém

Badatelské centrum PALS (Prague Asterix Laser System) bylo založeno v listopadu 1998 jako společné pracoviště Fyzikálního ústavu AV ČR a Ústavu fyziky plazmatu AV ČR. Tato laboratoř poskytuje základnu pro experimentální výzkum v oboru výkonových laserů a fyziky laserem vytvářeného plazmatu. Centrum bylo otevřeno externím uživatelům v září roku 2000.

Hlavním experimentálním zařízením Centra PALS je výkonový pulsní laserový systém Asterix IV. Systém Asterix IV byl vytvořen v německém Ústavu Maxe Plancka pro kvantovou optiku (MPQ) v Garchingu u Mnichova. Akademie věd České republiky koupila laserový systém Asterix IV za 1 symbolickou německou marku, na základě mezinárodní smlouvy s MPQ, schválené Evropskou komisí a podpořené organizací EURATOM v červnu 1997. Pro laser byla v Praze vystavěna na základě originálního českého projektu zcela nová moderní laserová hala. Její stavba byla dokončena v únoru 1999.

Modernizovaný laserový systém s názvem PALS byl v nové laboratoři spuštěn v květnu roku 2000 a od té doby je používán pro výzkum interakce s hmotou soustředěných výkonových laserových svazků o hustotě výkonu  $10^{14}$ - $10^{16}$  W/cm<sup>2</sup> a pro studium horkého laserového plazmatu. Laboratoř se zaměřuje na využití produktů laserového plazmatu a dále se používá pro nejrůznější aplikace ve vědě i v technice.

Mezi nosné výzkumné programy laboratoře patří vývoj a aplikace plazmových bodových zdrojů měkkého nekoherentního rentgenového záření, vývoj a aplikace plazmových rentgenových laserů, vývoj a aplikace plazmových zdrojů vysoce nabitých energetických iontů a studium chování hmoty v podmínkách extrémních tlaků a teplot pro potřeby materiálových věd, laboratorní astrofyziky, termojaderného výzkumu a dalších vědních oborů.<sup>[2]</sup>

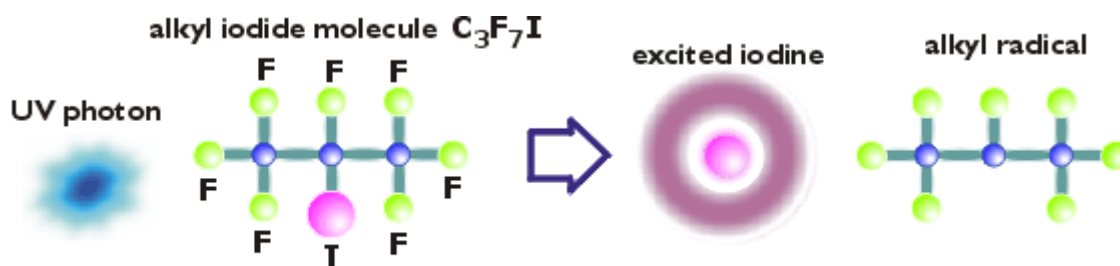
### 1.2.1 Laser

Nejdůležitější část Badatelského centra PALS je obří jódomý laserový systém, jeden ze tří největších laserů v Evropě. Ve stávající konfiguraci a na základní vlnové délce 1315 nm je schopen generovat v hlavním laserovém svazku infračervené záblesky (pulzy) o energii až 1 kJ. Část z této energie může být odvedena v několika vedlejších svazcích s řízeným časovým odstupem od hlavního pulzu. Vlnová délka laserových svazků, která může být konvertována na vlnovou délku odpovídající druhé (658 nm, červená) nebo třetí (438 nm, modrá) základní frekvence. Vzhledem k velmi krátké délce laserového pulzu (cca 350 ps) je pulzní výkon laseru obrovský – až 3 TW, tj. 3 milióny megawattů. Laser může dodat obří puls zhruba jednou za půl hodiny. Výstupní svazek laseru PALS je velmi kvalitní, tj. prostorově homogenní, a stabilní. Jeho energie se výstřel od výstřelu mění minimálně.<sup>[2]</sup>

#### Princip laseru

Asterix IV / PALS je plynový laser, jenž využívá atomů jódu ke generaci záření v blízké infračervené oblasti, na vlnové délce 1,315  $\mu\text{m}$ . Jódový atom je získáván z mateřské molekuly alkyljodidu  $\text{C}_3\text{F}_7\text{I}$  fotochemickým procesem, který se nazývá fotodisociace (nebo fotolýza). Z chemické vazby se uvolňuje atom prostřednictvím pulsního UV záření dodávaného výbojkami. Elektronový obal jódu, jenž vystupuje z fotodisociační reakce, je excitován. Tím jsou vytvořeny podmínky pro laserovou akci.<sup>[2]</sup>

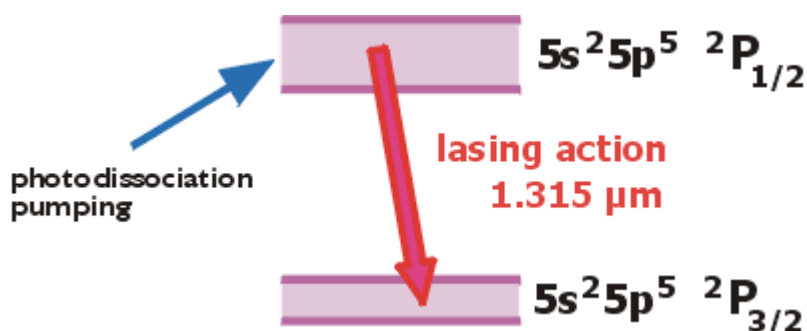
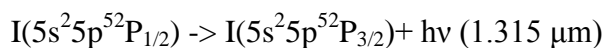




The iodine laser is pumped with energy released via photochemical reaction

Obrázek 1: Laserová akce. Zdroj: <sup>[2]</sup>

K laserové akci dochází mezi hladinami jemné struktury  $^2P_{1/2}$  a  $^2P_{3/2}$  základní konfigurace  $5s^25p^5$  neutrálního atomu jódu. Elektronová konfigurace těchto dvou hladin je zde zobrazena spektroskopickou notací příslušející tzv. LS vazbě, kterou lze použít na atomy se slabou spin-orbitální interakcí.

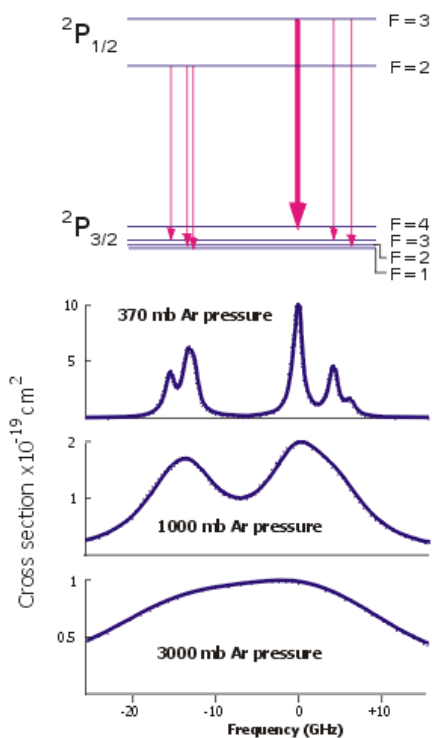


Obrázek 2: Přejchod mezi hladinami. Zdroj: <sup>[2]</sup>

Přejchod mezi hladinami  $^2P_{1/2}$  a  $^2P_{3/2}$  atomu jódu řadíme do skupiny magnetických dipólových přechodů. Deexcitace horní hladiny  $^2P_{1/2}$  na dolní hladinu  $^2P_{3/2}$  nemění charakter prostorového rozdělení náboje elektronového obalu – není tedy vytvářen

oscilující elektrický dipólový moment. Místo toho přechod vytváří oscilující magnetický dipólový moment.

Záření vyzářené přechodem mezi hladinami  ${}^2P_{1/2}$  a  ${}^2P_{3/2}$  je charakterizováno šesti blízkými spektrálními čarami, které ve spektroskopické terminologii označujeme jako komponenty. Tyto komponenty vznikají tím, že magnetické pole jádra jódového atomu (jaderný spin 5/2) štěpí vyšší a nižší hladinu do 2 a 4 tzv. hladin hyperjemné struktury, přičemž výběrová pravidla zredukuje počet možných přechodů mezi těmito hladinami na šest. Nejsilnější spektrální komponenty odpovídají přechodu  $F = 3 \rightarrow 4$ , kde  $F$  je celkový moment hybnosti hyperjemné hladiny.<sup>[2]</sup>



Obrázek 3: Spektrální komponenty. Zdroj:<sup>[2]</sup>

Aktivní médium laseru Asterix IV/PALS je kromě isopropyljodidu  $\text{C}_3\text{F}_7\text{I}$  (v chemické notaci  $i\text{-C}_3\text{F}_7\text{I}$ ) také argon (Ar), který působí jako tzv. nárazníkový (buffer) plyn. Poměr parciálních tlaků alkyljodidu a argonu, který je ve směsi v jednotlivých laserových modulech, se liší. Argon je vždy výrazně převažující složkou a typický

celkový tlak v koncových zesilovačích docílí řádově 1 až 3 atmosféry (1 000 až 3 000 mbar). Argon nikterak nepřispívá laserové akci, ale ve směsi má tři významné funkce.

Předně, atomovými srážkami rozšiřuje spektrální čáry emitovaného záření. Jednotlivé spektrální komponenty se tím “slévají” v jedinou spektrální čáru, jak je ukázáno na obrázku č. 3. To zvyšuje účinnost systému a snižuje zisk zesílení malého signálu, což efektivně utlumí možné parazitické oscilace laserového řetězce.

Za druhé, argon zlepšuje homogenitu čerpání v příčném směru tím, že “rozředuje” alkyljodid v aktivním prostředí – parciální tlak alkyljodidu je nízký, ačkoliv celkový tlak směsi (nutný pro výše popsané rozšíření spektrální čáry) je vysoký.

Za třetí, argon působí jako tepelný zásobník absorbující část tepelné energie deponované do aktivního prostředí výbojkami. Díky tomu výrazně zamezuje nežádoucímu tepelnému rozkladu aktivního média ve fotolyzované pracovní směsi.

Volné alkylové radikály a jódové atomy vzniklé fotodisociací jsou chemicky vysoce reaktivní a mají silnou tendenci účastnit se řady různých radikálových reakcí. Nejdůležitější reakční kanály jsou tři:

$C_3F_7 + I \rightarrow C_3F_7I$	<b>(repairing recombination)</b>
$C_3F_7 + C_3F_7 \rightarrow C_6F_{14}$	<b>(dimerisation)</b>
$I + I \rightarrow I_2$	<b>(molecular formation)</b>

Obrázek 4: Reakční kanály. Zdroj:<sup>[2]</sup>

Konečné produkty dimerizace alkylových radikálů (tj. nasycené perfluorované uhlovodíky) nemají vliv na schopnost dalšího fungování pracovní směsi. Molekuly jódu jsou produkovány především třetí z uvedených reakcí a mají silně korozivní účinky.

Směs je proto po každém výstřelu laseru vedena do kryogenních jednotek, které obsahuje kapalný alkyljodid. Teplota jednotky je udržována na hodnotě, při níž se tenze par kapalného alkyljodidu rovná jeho parciálnímu tlaku v pracovní směsi.

Molekulární jód z ozářené směsi je odchyťován v kapalném alkyljodidu. Nové molekuly alkyljodidu jsou do ozářené směsi z kapalně fáze doplněny. Ozářená pracovní směs se tímto regeneruje. Poté se vrací zpět do příslušného laserového modulu, jenž je připraven k dalšímu výstřelu.<sup>[2]</sup>

### 1.2.2 Historie experimentálních laserů

Prvním jódomý laser byl v roce 1975 60-gigawattový fotodisociační laser ASTERIX III, který byl spuštěn v Ústavu fyziky Maxe Plancka v Garchingu u Mnichova. O dva roky se uvedení do provozu dočkal 300-gigawattový laser v moskevském P. N. Lebedeva Akademii věd SSSR.<sup>[2] [3]</sup>

V roce 1991 byl v Garchingu, v nově založeném Ústavu kvantové optiky, postaven mnohem výkonnější terawattový ASTERIX IV.<sup>[2] [4]</sup> Od té doby se využíval jako spolehlivý nástroj pro vytváření horkého laserového plazmatu pro fyziky z celého světa. Tento typ laseru nejprve sloužil k výzkumu termojaderných aplikací (převážně pro uskutečnění termojaderné fúze), později se ukázalo, že laser zdaleka nestačí pro zapálení termojaderné reakce, ale možnosti jeho praktického využití překračují jeho původní rámec termojaderných aplikací.<sup>[2] [5]</sup>

V první polovině 80. let minulého století začíná historie jódomých laserů v Československu, když Fyzikální ústav ČSAV získal darem výkonný jódomý laserový systém vyvinutý v Lebeděvově ústavu v Moskvě. Laser byl přestaven a uveden do provozu roku 1985. V roce 1992 došlo ke spuštění jeho následovníka PERUN II v nové laserové laboratoři Oddělení plynových laserů FZÚ AV ČR.<sup>[2] [6]</sup>

Laser PERUN i PERUN II slavil v Praze až do roku 1997 řadu úspěchů, zejména při výzkumu laserových zdrojů mnohonásobně nabitých iontů.<sup>[2] [7]</sup>

V roce 1997 byl výzkum laserového plazmatu v Garchingu zastaven a laser ATERIX IV nabídnut k využití jiným evropským výzkumným institucím, mezi nimi i Fyzikálnímu ústavu AV ČR. Praha nakonec v soutěži zvítězila a 30. června 1997 došlo k podepsání mezinárodní smlouvy o jeho převzetí. Od roku 2000 slouží svým původním i novým uživatelům.<sup>[2]</sup>

Jódový laser ASTERIX IV se pro svou relativní jednoduchost a schopnost generovat velké světelné výkony stal objektem zájmu fyziků z celého světa.<sup>[2] [8]</sup>

### **1.3 Ionizující záření**

Ionizujícím zářením se označuje takové záření, jehož kvanta mají natolik vysokou energii, aby přímo nebo nepřímo emitovaly elektrony z atomového obalu a tím látku ionizovat. Jedná se o tok fotonů elektromagnetického záření nebo hmotných částic mající schopnost ionizovat atomy prostředí nebo excitovat jejich jádra. Ionizující záření vzniká jako vedlejší jev jaderných procesů, při kterých se dostává atom do excitovaného stavu a stává se energeticky nestabilním. Stabilního stavu dosáhne tím, že uvolní ionizující záření. Většina radioaktivních látek okolo nás je radioaktivní přirozeně, nedochází k vyrazení elektronu z atomového obalu.

Všechny radioaktivní látky mají jeden charakteristický znak, a to klesající aktivitu v závislosti na čase. Pro přeměnu poloviny jader přítomných na počátku je potřebný určitý čas. Tento čas se nazývá poločas rozpadu a je konstantní bez ohledu na vnější vlivy. Po dvou poločasech rozpadu se sníží aktivita na čtvrtinu.<sup>[9]</sup>

#### **1.3.1 Druhy ionizujícího záření**

Ionizační účinky jsou společným rysem všech druhů ionizujícího záření. Podle interakcí záření s hmotou jej můžeme rozdělit na záření přímo ionizující a záření nepřímo ionizující. Rovněž můžeme rozpoznat záření korpuskulární a vlnové. Posledním důležitým rozlišením je záření alfa, beta, fotonové (gamma a X rentgenové) a záření neutronové. Pro oblast diplomové práce je nejdůležitější fotonové záření.<sup>[9]</sup>

### Záření alfa

Záření alfa vzniká při rozpadu jader těžkých prvků, jako je např. uran, thorium, radium a jádra transuranů. Při rozpadu těchto těžkých jader jsou uvolňovány částice  $\alpha$ , což jsou jádra helia, která se skládají každé ze dvou protonů a neutronů.

Záření alfa má velmi krátký dolet, díky čemuž je tuto částici schopen odstínit i list papíru či neporušená pokožka. Pokud se nuklidy, které emitují záření alfa, dostanou do těla požitím nebo vdechnutím, je zde vysoké riziko, že přímo ozáří nechráněné vnitřní tkáně a způsobí biologické poškození.<sup>[9][10]</sup>

### Záření beta

Záření beta je tvořeno elektrony nebo pozitrony. Podle toho můžeme rozdělit záření na  $\beta^-$  a  $\beta^+$ . Při záření  $\beta^-$  vylétá z jádra elektron, jenž vznikl v jádře, přeměnou neutronu na proton, elektron a neutrino. Tento typ záření svými elektrickými účinky ionizuje látku, čímž se brzdí, a má tak v látkovém prostředí poměrně krátký dolet (v tkáni je to přibližně 3-4 mm). Při záření  $\beta^+$  vylétá z jádra pozitron, který je antičástice elektronu. Pozitron vznikl v jádře při přeměně protonu na neutron, pozitron a neutrino. Ionizační účinky i dolet této částice jsou velmi podobné jako u záření  $\beta^-$ . Beta zářičem je například izotop draslíku  $^{40}\text{K}$  nebo thoria  $^{234}\text{Th}$ .<sup>[9][11]</sup>

### Záření gama

Záření gama je fotonové vysokoenergetické, krátkovlnné elektromagnetické záření, které je vyzařováno při přeměnách a dalších procesech většinou nestabilních atomových jader. Fotony záření gama nemají žádný elektrický náboj. To znamená, že se jedná o nepřímou ionizující záření. Díky interakci kvanta gama s látkou (fotoefekt, Comptonův rozptyl nebo vznik elektron – pozitronových párů) vznikají velmi rychlé elektrony, které již ionizují přímo. Většina radionuklidů v přírodě jsou smíšené zářiče, buď  $\alpha + \gamma$  nebo  $\beta + \gamma$ . Jen některé zářiče jsou čisté  $\alpha$  nebo čisté  $\beta$ . Čisté  $\gamma$  v přírodě neexistují.

V závislosti na své energii mohou paprsky gama lehce proniknout lidským tělem. Vhodným stíněním je například tlustá stěna betonu nebo olova.<sup>[9] [12]</sup>

### Záření X (rentgenové)

Jedná se o fotonové záření zahrnující brzdné záření, které vzniká zabrzděním nabitých částic v elektrických polích v rentgence a charakteristické záření, vysílané při přechodu elektronu v atomu na nižší energetickou hladinu v atomovém obalu.<sup>[9] [14]</sup>

### Neutronové záření

Neutrony jsou nenabitě elementární částice. Zdrojem neutronového záření můžou být například radionuklidové zdroje, neutronové generátory a jaderné reaktory. Při průniku neutronů člověkem (složen především z atomů lehkých prvků – H, O, N, C), jsou základními interakcemi z hlediska biologického účinku – pružný rozptyl neutronů na jádrech uvedených prvků, zejména vodíku, dále reakce (n, gama) na jádrech vodíku a reakce (n, p) na jádrech dusíku, (n, alfa) na jádrech kyslíku. V důsledku těchto interakcí vznikají jak přímo ionizující částice – protony, alfa částice, tak fotony. Neutronové záření se dá odstínit vrstvou vody nebo jiného materiálu bohatého na vodík, jelikož se účinně zpomalují srážkami s protony.<sup>[9] [13]</sup>

### **1.3.2 Účinky ionizujícího záření**

Biologické znalosti o účincích ionizujícího záření jsou v současné době sice velmi rozsáhlé, ale dosud ne zcela úplné. Především se jedná o klinické a experimentální pozorování. Pro vymezení principů a kritérií radiační ochrany z nichž je dále odvozen systém limitování dávek u pracujících a obyvatelstva je důležitá znalost biologických účinků. Stejně tak je základem pro poskytování léčebné péče při poškození zářením a při poskytování první pomoci při nehodě na pracovišti.

Během působení ionizujícího záření dochází k ionizaci a excitaci a při tom je absorbována energie. Na tento fyzikální proces navazuje řada dějů důležitých pro živou hmotu. Je prokázáno, že množství energie ionizujícího záření, potřebné např.

k usmrcení jedince, je nezvykle malé v porovnání s jinými druhy energie. Tento nesoulad byl jedním z podmětů k vypracování různých teorií o účincích záření na živou hmotu. Účinky záření na buňku lze rozdělit do dvou skupin:<sup>[15]</sup>

#### Smrt buňky neboli buněčná delecce

Při relativně vysokých dávkách záření je možné usmrtit buňku v klidovém období (interfáze). Významnějším typem buněčné smrti je v této oblasti zánik vázaný na buněčné dělení (mitoza). Poškození buňky se neprojeví ihned, ale buňka není schopna se dále dělit. Jde o tzv. mitotickou smrt buňky, kterou lze pozorovat již při menších dávkách záření, které nestačí na smrt v klidové fázi. Odtud můžeme vyvodit, že smrtící účinek záření na buňky se nejnáze projeví ve tkáních, pro které je typické rychlé buněčné dělení, např. krvetvorné orgány.<sup>[15]</sup>

#### Změna tzv. cytogenetické informace.

V tomto případě se jedná o změny, jež bezprostředně nenarušují průběh buněčného dělení ale mění genetickou informaci v jádře buňky. Ionizující záření vyvolává změny zvané mutace, které lze dělit na mutace gametické (odpovědné za genetické účinky záření) a mutace somatické (projevují se u nositele, v ozářené tkáni). Existují však i jiná dělení mutací.<sup>[15]</sup>

Lidské tělo je složeno ze tkání a orgánů, které nemají stejnou citlivost k ozáření, tzv. radiosenzitivitu. Proto při stejné absorbované dávce způsobí v různých tkáních rozdílné biologické účinky. Podobně i vnímavost orgánů a tkání k vyvolávání cytogenetického efektu je rozdílná, přičemž vzniká různá citlivost ke vzniku nádorů. Vedle těchto mechanismů je konečný účinek ionizujícího záření na buňky a tkáně závislý na reparačních mechanismech. Nejdříve dochází k časné reparaci, při které se obnovují schopnosti dalšího dělení buňky. Poté dojde k reparaci sekundární, při níž je postižená tkáň nahrazena funkčním pojivem. K popsáním reparačním mechanismům



však dojde pouze v případě, že se jedná o frakcionované ozáření. Účinky záření jsou rozdílné - menší pokud je dávka rozdělena do několika frakcí, nebo do delšího časového intervalu než účinky stejně velké dávky obdržené jednorázově.

Celkový účinek ionizujícího záření závisí také na prostorovém rozložení dávky. Naprosto odlišnou biologickou reakci má lokální ozáření, při kterém jsou narušeny pouze určité tkáně. Pokud stíníme část těla, uchovává se určitá část kmenových buněk, ze nichž může dojít poté k regenerace tkáně.<sup>[15]</sup>

Z hlediska vztahu dávky a účinku rozlišujeme dva základní typy účinků:

**Stochastické účinky:** vyskytují se s určitou pravděpodobností, jež je úměrná ozáření. Očekává se pro ně bezprahový, lineární vztah mezi dávkou a účinkem. Vyskytují se po uplynutí docela dlouhého času od ozáření. Důsledkem jsou různé typy rakoviny, která je indukována ozářením. Závislost těchto účinků na dávce má statistickou povahu, proto pro ně bylo zavedeno označení stochastické (pravděpodobné, náhodné). S dávkou roste pro jednotlivce pravděpodobnost poškození.<sup>[15]</sup>

**Deterministické (nestochastické) účinky:** jsou spojeny se zdravotním poškozením, jež je charakterizováno určitou prahovou dávkou. Při zvyšující se dávce se zvyšuje i závažnost poškození. Pod prahovou dávkou se účinky ozáření neprojeví. Tyto účinky se projeví na určitém ozářeném jedinci a mají charakteristický klinický obraz. Rozsah poškození závisí na absorbované dávce a do určité míry také na dávkovém příkonu. Mezi deterministické účinky IZ jsou zahrnuty zejména akutní nemoc z ozáření (ANO), nebo radiační dermatitidu.<sup>[15] [16]</sup>

## 1.4 Dozimetrie

Slovo dozimetrie pochází z řeckého slova „dosis“, které znamená dávka a „metreo“ lze přeložit jako měřit. Její funkce lze odvodit přímo z jejího názvu. Zabývá se tedy měřením dávek ionizujícího záření, ale i jinými problémy, které s ním souvisí.<sup>[17]</sup>

Potřebu provádět měření ustanovuje zákon 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření v platném znění (Atomový zákon), který určuje, že držitel povolení je povinen sledovat, měřit, hodnotit, ověřovat a zaznamenávat veličiny, parametry a skutečnosti důležité z hlediska jaderné bezpečnosti a radiační ochrany.<sup>[18]</sup>

S měřením ionizujícího záření se mohou lidé setkat při jeho použití nebo při použití radionuklidů, při dozimetrické kontrole při průmyslovém nebo léčebném ozařování nebo při monitorování radiační zátěže okolí. Měří se nepřímou na základě procesů, které záření způsobuje při absorpci v určité látce. Výsledek těchto procesů se následně převádí na pozorovatelné signály.<sup>[19]</sup>

Pro dozimetrii jsou důležité hlavně tyto oblasti:

- Zdroje IZ
- Pole IZ
- Interakce IZ

### 1.4.1 Zdroje ionizujícího záření

Každý předmět, přístroj, látka nebo preparát, jenž emituje ionizující záření, se označuje jako zdroj ionizujícího záření či zkráceně zářič. Zářiče lze rozdělit podle několika kritérií. Podle principu a mechanismu vzniku záření se zářiče rozdělují na:

**Elektronické zdroje záření:** v těchto zářičích vzniká ionizující záření v důsledku elektromagnetického urychlování nabitých částic. Jedná se především o rentgenové trubice produkující brzdné rentgenové záření a urychlovače částic.<sup>[20]</sup>

Pro oblast diplomové práce jsou nejdůležitější urychlovače částic. Urychlovače lze z hlediska účelu klasifikovat do dvou skupin. Pro průmyslové nebo medicínské použití nejsou zapotřebí extrémně vysoké energie, ale je potřeba dosáhnout co největšího toku částic. Naopak ve výzkumu ve fyzice částic vysokých energií je třeba docílit co největší energie urychlených částic. Z hlediska praxe radiační ochrany je významnější spíše první skupina.

V urychlovačích nabitých částic jsou ionty nebo elektrony urychlovány pomocí elektrického pole využívající buď svazku těchto nabitých částic, nebo sekundárních částic, které vznikají při interakčních procesech na vhodných terčích.

Mezi urychlovače částic lze zařadit lasery (zdravotnické, průmyslové, experimentální) i rentgenky.<sup>[21]</sup>

**Radioaktivní zářiče:** v nichž ionizující záření vzniká jako výsledek radioaktivních přeměn jader. Mohou vznikat také při jaderných reakcích, štěpení a slučování jader. Mezi mohutné zdroje záření patří jaderné reaktory. V medicíně se pak využívají cesiové a kobaltové ozařovače.

**Záření vesmírného původu:** vzniká při bouřlivých a vysoce energetických procesech ve vesmíru – termionukleární reakce v nitru hvězd, výbuchy supernov, procesy v okolí černých děr, rázové vlny v ionizovaném plynu apod.<sup>[20]</sup>

Zdroje IZ lze rozdělit podle tvaru na bodové, lineární, plošné a objemové. Na geometrii, rozměrech zdroje, ale také na jeho hmotnosti a na parametrech radionuklidů ve zdroji (např. aktivita, poločas, typ a energie záření) závisí množství záření, jež je zdrojem emitováno. Část záření se vyzáří do okolí, část záření může být pohlceno ve vlastním zdroji, tzv. samoabsorpce. V průběhu samoabsorpce se sníží počet částic alfa, beta nebo fotonů či neutronů. Stejně tak se může změnit typ, energie a směr

tohoto záření. Záření vystupující ze zdroje, vytváří ve svém okolí tzv. pole ionizujícího záření.<sup>[22]</sup>

#### **1.4.2 Pole ionizujícího záření**

Tvar a charakteristika pole IZ jsou důležité pro objekty vyskytující se v tomto poli, ať se jedná o vzduch nebo jiné subjekty. Základní veličinou pole je emise (tok) částic nebo energie, což je definováno jako celkové množství částic nebo energie, které se dostane ze zdroje za jednotku času. Velmi důležité jsou rovněž parametry popisující rozložení pole záření v prostoru. Pokud víme, že záření se šíří všemi směry, pak pole IZ se vztahuje k nekonečně malému objemu kulového tvaru.

Definují se takové veličiny, jako je fluence, hustota toku, radiance apod. Pole se nachází buď ve vakuu, nebo v reálném prostředí, kde dochází k interakci ionizujícího záření s hmotou.<sup>[23]</sup>

#### **1.4.3 Interakce ionizujícího záření**

##### Interakce záření s hmotou

Interakci lze chápat jako jeden celek, přičemž nerozlišujeme, ke kterému procesu dochází. Nebo také je možné rozlišit jednotlivé typy interakce dané částice ionizujícího záření s daným materiálem samostatně. Interakce je definovaná jako pravděpodobnost jakékoliv reakce částice s hmotou. Daná interakce je tím silnější, čím větší je podíl pravděpodobnosti na jednu částici ionizujícího záření a na jednu částičku hmoty (tj. atom nebo jádro). Efekt interakce bývá v konečném důsledku tím větší, čím větší je hustota částic záření, nebo hustota částiček hmoty, nebo obojí.<sup>[22]</sup>

##### Interakce záření s živou hmotou

Specifickou skupinu představuje interakce záření s živou hmotou. Nejdůležitější je v tomto případě interakce s lidským organizmem. Tímto sektorem se zabývá osobní dozimetrie (především pro pracovníky se zdroji ionizujícího záření), nebo radiační

kontrola okolí zdroje (zejména pro obyvatelstvo), anebo klinická dozimetrie (ochrana pacientů i zdravotnického personálu při lékařských použitích ionizujícího záření).

Nejlepší ochranou před IZ je nepohybovat se ve zvýšeném poli ionizujícího záření. V praxi to ale často není možné a proto je velmi nutné se chránit aktivně, tj. snížením toku ionizujícího záření a jeho energie přímo u zdroje (v radiodiagnostice např. snížením napětí a proudu na rentgence), nebo pasivně níže popsanými: časem, vzdáleností a stíněním.<sup>[22]</sup>

## **1.5. Osobní monitorování**

Osobní monitorování je ve Vyhlášce Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB) č. 307/2002 Sb. o radiační ochraně, v platném znění (dále jen Vyhláška) definováno takto: „*Osobní monitorování slouží k určení osobních dávek sledováním, měřením a hodnocením individuálního zevního i vnitřního ozáření jednotlivých osob zpravidla osobními dozimetry*“.<sup>[24]</sup>

### **1.5.1 Monitorování zevního ozáření osob**

Monitorování zevního ozáření znamená měření dávek způsobených zdroji ionizujícího záření, jež jsou vně ozářeného těla pracovníka.

Ve Vyhlášce je monitorování definováno jako: „*Cílené měření veličin charakterizujících ozáření, pole záření nebo radionuklidy a hodnocení výsledků těchto měření pro účely usměrňování ozáření.*“ Monitorování má za úkol pověřená oprávněná dozimetrická služba, což je osoba, která provádí odečet nebo výklad hodnot registrovaných osobními dozimetry nebo jiná hodnocení vnějšího ozáření. Dále se provádí měření radioaktivity v lidském těle a v biologických vzorcích nebo hodnocení vnitřního ozáření, které dovolí určit roční efektivní dávku nebo její úvazek.<sup>[25]</sup>

### 1.5.2 Dozimetr

Jako dozimetr se užívá látka, která po ozáření mění své fyzikální nebo chemické vlastnosti. Tuto změnu lze následně změřit a je přímo úměrná dávce záření. Osobní dozimetr se využívá k měření dávky a dávkového příkonu záření.<sup>[19]</sup>

Dozimetry můžeme rozdělit podle toho:

- jaký typ záření dokáží měřit ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , n)
- které veličiny měří (dávkový příkon, dávka, aj.)
- na jakém principu měří (diferenciální, integrální)
- jaká látka se používá jako detektor (plyn, kapalina, pevná látka)<sup>[26]</sup>

Je snaha najít v oblasti osobní dozimetrie tzv. ideální dozimetr. Důraz se klade hlavně na přesné měření požadované dozimetrické veličiny v širokém intervalu hodnot, a to pokud to jde pro všechny druhy záření odděleně. Měl by být schopen zhodnotit geometrii ozáření osoby v daném radiačním poli. Požadavky jsou hlavně kladeny na ekonomické a technické parametry, jako jsou např. necitlivost k jiným fyzikálním a chemickým vlivům (teplotě, světlu, vlhkosti apod.), dále jednoduché vyhodnocení, stabilita, zachování odezvy (i v případě, že dojde k výpadku napájení) a v neposlední řadě také přijatelné mechanické parametry (rozměry, hmotnost, mechanická odolnost atd.).<sup>[27]</sup>

Ideální dozimetr se asi nikdy nepodaří vytvořit, proto je potřeba nalézt alespoň optimální splnění uvedených požadavků. Ve vývoji osobních dozimetrů jde hlavně o to, vyrobit takový dozimetr, aby byl schopen stanovit danou veličinu energeticky nezávisle, tzn. správně a dostatečně přesně posoudit ozáření osoby bez ohledu na to v jakém radiačním poli byla ozářena (z hlediska energetické distribuce).<sup>[26]</sup>

Důležité pro zajištění správnosti a přesnosti hodnocení odezvy dozimetru je jeho kalibrace. Je nezbytnost mít k dispozici reprezentativní soubor referenčních, kalibračních polí a technických prostředků, které umožní provést kalibraci a otestovat:

- linearitu odezvy osobního dozimetru a rozsah měřitelnosti dané veličiny
- závislost odezvy k různým druhům záření
- závislost odezvy dozimetru na úhlové distribuci radiačního pole
- citlivost na různé fyzikální a chemické faktory
- stabilitu odezvy v čase <sup>[28]</sup>

Pracovník s ionizujícím zářením má za povinnost nosit osobní dozimetr na předepsaném místě, což je levá strana hrudníku. Pokud dozimetr, který je umístěn na referenčním místě, nedovoluje odhad efektivní a ekvivalentní dávky v orgánech a tkáních, je pracovník vybaven ještě doplňkovým dozimetrem, jež svými vlastnostmi nebo umístěním odhad dávky umožní.<sup>[24]</sup>

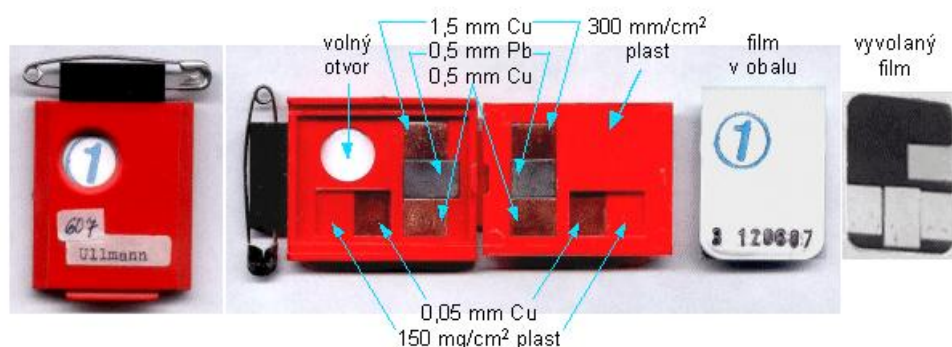
### Osobní filmový dozimetr

Základním typem osobního dozimetru v polích záření gama a ve směsných polích záření gama a beta je stále filmový dozimetr. Dozimetrický film bývá překryt oboustranně sadou filtrů tvořených zpravidla Cu, Al, Pb, Sn, a jinými prvky.<sup>[24]</sup>

Výrazná závislost odezvy filmového dozimetru na energii fotonů a elektronů povoluje, aby při použití části nestíněného dozimetru a vhodné sady absorpčních filmů byl z něj tvořen vícesložkový dozimetr, a pak na základě vyhodnocení zčernání filmu pod nestíněnou plochou a pod jednotlivými filtry je možno stanovit měřenou dozimetrickou veličinu.

Filmový dozimetr se skládá z dozimetrické kazety s kompenzačními filtry a dozimetrického filmu (viz obrázek 5). Dává informace o osobním dávkovém ekvivalentu od fotonového záření a elektronů, druhů a energií záření, směru a časovém rozložení ozáření a o případné kontaminaci. Tepelné neutrony lze měřit pouze s upravenými kazetami.<sup>[29]</sup>

Mezi výhody filmového dozimetru patří trvalý záznam údajů o ozáření s možností opětovné analýzy vyvolaného filmu. Nevýhodou je pak přílišná citlivost na světlo, vysokou vlhkost, teplotu a některé chemikálie. V současné době patří filmový dozimetr mezi ekonomicky nevýhodný. A z hlediska okamžitého zjištění dávky méně výhodný než elektronické dozimetry.<sup>[30]</sup>



Obrázek 5: Filmový dozimetr. Zdroj:<sup>[29]</sup>

### Elektronické dozimetry

Elektronické dozimetry pracují zpravidla na principu Geiger – Millerových detektorů nebo modernějších polovodičových křemíkových – detektorů nebo malých ionizačních komor. Jsou způsobilé detekovat rozpětí energií fotonů IZ od 20 keV až po 6 MeV, neutronové záření a elektronové záření. Také jsou schopny změřit osobní dávkový ekvivalent  $H_p(0,07)$  a  $H_p(10)$  zároveň a odděleně pro záření  $\gamma$  a  $\beta$ . Tento typ dozimetrů se nejčastěji používá v jaderných elektrárnách. Díky jejich cenové dostupnosti a nízkým provozním nákladům se začínají využívat i v jiných oblastech.

Výhodou elektronických dozimetrů je vysoká citlivost (asi od 1  $\mu\text{Sv}$ ), okamžitá informace o získané dávce nebo dávkovém příkonu, možnost nastavení alarmu pro nastavitelnou referenční úroveň, absence procesu složitého a časově náročného vyhodnocování a vyvolávání. Jejich velkou nevýhodou je možnost zkreslení měření



magnetickým polem např: použitím mobilních telefonů, čteček magnetických karet, svařováním atd.<sup>[31]</sup>



Obrázek 6: Elektronický dozimetr Zdroj:<sup>[31]</sup>

### Termoluminiscenční dozimetry

Jsou založeny na látkách, které po ozáření a následném zahřátí vyzařují viditelné světlo. Reakcí na ozáření je pak vhodná fotometrická veličina, většinou světelný tok.

Vyhodnocení se dělá pomocí aparatury obsahující fotonásobič (jenž detekuje fotony vyvolané v daném materiálu po jeho ohřevu na teplotu, která je pro tento materiál specifická) spojený s vyhodnocovací a registrační jednotkou.

Výhodou těchto dozimetrů je vysoká citlivost a možnost přesného měření odezvy, široká oblast lineární závislosti mezi dávkou a odezvou dozimetru – odezva detektoru. Mezi nevýhody patří např. jejich citlivost na světlo, použití tenkých TL – detektorů u záření beta, kde světlotěsný obal zvyšuje energetický práh detekce. Osobní TL dozimetr je zkomponován z dozimetrické kazety s kompenzačním filtrem a skleněného termoluminiscenčního detektoru.<sup>[32]</sup>

## 1.6 Radiační ochrana

Mezi hlavní cíle radiační ochrany patří vyloučení deterministických účinků a snížení rizik stochastických účinků na rozumně přijatelnou úroveň.

Radiační ochranu můžeme definovat jako soubor technických a organizačních opatření k omezení ozáření fyzických osob a k ochraně životního prostředí. <sup>[33]</sup>

V České republice řešila radiační ochranu dříve vyhláška MZ ČR č. 59/1972 Sb., o ochraně zdraví před ionizujícím zářením. V roce 1997 byl přijat zákon č. 18/1997 Sb., a navazující předpisy – tzv. „Atomový zákon“. Ten respektuje jak doporučení ICRP, tak i legislativu zemí EU.

Zásadními principy ochrany redukcující zevní ozáření jsou principy ochrany vzdáleností, časem a stíněním a jejich vzájemná kombinace.

**Ochrana časem:** dávkový příkon pracovníka je tím větší, čím déle se nachází v blízkosti zdroje záření. Metoda ochrany časem zahrnuje také střídání pracovníků, zvláště na nejvíce exponovaných místech.

**Ochrana vzdáleností:** jelikož dávka, resp. dávkový příkon se snižuje s druhou mocninou vzdálenosti od zdroje, je výskyt pracovníka, v co největší vzdálenosti od zdroje důležitý.

**Ochrana stíněním:** při návrhu stínění se nejprve uskutečňují výpočty a měření radiačního pole bez stínění. Potom se určí taková hodnota dané veličiny, která má být stíněním v daném prostoru dosažena. Poměr těchto hodnot se nazývá koeficient zeslabení. Nejvhodnějším materiálem pro odstínění záření gama je olovo pro jeho snadnou zpracovatelnost, dostupnost a cenu. <sup>[34]</sup>

### 1.6.1 Veličiny radiační ochrany

Biologický účinek ionizujícího záření je přímo závislý na absorbované dávce a na druhu ionizujícího záření. Poměr dávek záření potřebných u dvou druhů záření

k vyvolání téhož stupně biologického účinku se nazývá relativní biologická účinnost (RBÚ). Jako referenčního záření se nejčastěji používá rentgenového záření (v odborné literatuře se uvádí rozmezí energie 200 - 250 keV) nebo záření  $\gamma$  kobaltu  $^{60}\text{Co}$  či Cesia  $^{137}\text{Cs}$ .

**Dávkový ekvivalent „H“** je součin dávky „D“ v uvažovaném bodě tkáně a jakostního činitele „Q“.

$$H = Q * D$$

H - dávkový ekvivalent;

Q - jakostní činitel;

D - dávka.

Jakostní činitel udává rozdílnou biologickou účinnost různých druhů záření. Jeho hodnoty jsou funkcí lineárního přenosu energie „L“.

Jednotkou je 1 sievert (Sv), rozměr  $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$

K monitorování osob se využívá osobní dávkový ekvivalent „ $H_p(d)$ “. Jde o dávkový ekvivalent v daném bodě pod povrchem těla v hloubce tkáně „d“. Dávkový ekvivalent se nejčastěji používá k limitování ozáření. Pro pronikavé záření se zpravidla myslí v hloubce 10 mm pod povrchem – tj. „ $H_p(10)$ “, někdy nazývaný „hluboký“ dávkový ekvivalent a pro nepronikavé záření (např.  $\beta$ ) a ozáření kůže se uvažuje v hloubce 0,07 mm pod povrchem – tj. „ $H_s(0,07)$ “, zvaný někdy „mělký“ dávkový ekvivalent.

Podíl „ $dH$ “ a „ $dt$ “, kde „ $dH$ “ je přírůstek dávkového ekvivalentu za časový interval „ $dt$ “, se zvaný příkon dávkového ekvivalentu.

$$H \cdot = dH/dt$$

Jednotkou je Sv.s<sup>-1</sup>

Mezinárodní komise pro ochranu před zářením doporučila v roce 1990 zrušit veličinu dávkový ekvivalent a nahradit ji veličinou **ekvivalentní dávka „H<sub>T</sub>“**, která se vypočítá jako součet součinů radiačního váhového faktoru „w<sub>R</sub>“ a střední absorbované dávky „D<sub>T,R</sub>“ v orgánu nebo tkáni „T“ pro ionizující záření typu „R“.

$$H_T = \Sigma (W_R * D_{T,R})$$

H<sub>T</sub> - ekvivalentní dávka;

D<sub>T,R</sub> - střední absorbovaná dávka ve tkáni či orgánu, způsobená zářením druhu R;

W<sub>R</sub> - příslušný radiační váhový faktor.

Jednotkou ekvivalentní dávky je J.kg<sup>-1</sup> a má název sievert (Sv).

Hodnoty radiačního váhového faktoru plní stejnou funkci jako hodnoty „Q“, ale váhový faktor navíc určuje další okolnosti ozáření (např. orientaci těla vůči směru záření).

ICRU upřednostnila používání dávkového ekvivalentu před ekvivalentní dávkou a to hlavně proto, že ekvivalent je použitelnější pro měření. Česká legislativa (Vyhláška 307/2002) vychází z obou materiálů a pro limitování ozáření upřednostňuje veličinu **efektivní dávka E**. Jedná se o součet ekvivalentních dávek v jednotlivých tkáních či orgánech vážených **tkáňovým váhovým faktorem „W<sub>T</sub>“**, jež charakterizuje rozdílnou radiosenzitivitu orgánů a tkání z hlediska pravděpodobnosti vzniku stochastických účinků (zhoubných nádorů a genetických změn).

$$E = \Sigma (W_T * H_T)$$

E - efektivní dávka;

$H_T$  - ekvivalentní dávka,

$W_T$  - příslušný tkáňový váhový faktor.

Jednotkou efektivní dávky je  $J.kg^{-1}$  - 1 sievert (Sv).

Součet všech váhových faktorů příslušných jednotlivým orgánům a tkáním je roven 1,0. To znamená, že tkáňové váhové faktory vyjadřují podíl jednotlivých orgánů a tkání na celkovém riziku stochastických poškození při celotělovém ozáření. Zásadní výhodou efektivní dávky je možnost zjistit (při nerovnoměrném ozáření) radiační zátěž těla jediným číslem.

**Kolektivní efektivní** (ev. ekvivalentní) **dávka „S“** je součet efektivních (ekvivalentních) dávek všech jednotlivců v určité skupině.

Jednotkou je opět 1 Sv.<sup>[35] [36]</sup>

## 2. HYPOTÉZA A METODIKA VÝZKUMU

### 2.1 Hypotéza

1. Dávky jsou měřitelné osobními elektronickými dozimetry
2. Výsledky měření pomocí elektronických dozimetrů jsou porovnatelné s měřením pomocí filmů

### 2.2 Metodika výzkumu

Teoretická část diplomové práce byla zpracována studiem odborné české i zahraniční literatury. Převážně jsem prostudovala odborné články na toto téma. Dále se teoretická část opírá o běžně dostupné publikace o radiační ochraně, dozimetrii a radioaktivitě.

Výzkumná část probíhala na Fyzikálním ústavu AV ČR v Badatelském centru PALS. K výzkumné části jsem použila dozimetry zapůjčené Zdravotně sociální fakultou Jihočeské univerzity, dále pak filmové dozimetry a termoluminiscenční dozimetry zapůjčené pod záštitou Fyzikálního ústavu AV ČR v Praze. Tyto dozimetry jsem poté rozmístila v interakční hale u dvou experimentů.

První experiment vedl T. Pisarczyk z Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion a experiment se zabýval Femtosecond interferometric investigation of initial stages of the shock ignition relevant plasmas generated by laser irradiation of planar targets.<sup>[37]</sup> Druhý experiment vedl J. Krása a experiment se zabýval účinnou produkcí fúzních neutronů v Z-pinčích a v laserem produkovaném plazmatu.<sup>[38]</sup>

Při prvním experimentu bylo použito 10 kusů elektronických osobních dozimetrů typ DMC 2000 XB a zároveň 10 kusů filmových dozimetrů CSOD. Tyto dva typy dozimetrů jsem rozmístila po celé interakční hale. Většinou byla snaha umístit oba typy dozimetrů u sebe, abychom získali porovnání v naměřených hodnotách. Dva filmové dozimetry byly umístěny do samotné interakční komory.

U druhého experimentu jsem použila k porovnání místo filmových dozimetrů termoluminiscenční dozimetry. Elektronických dozimetrů bylo opět 10 kusů. Termoluminiscenčních dozimetrů bylo 7 sad po čtyřech krystalcích. Tentokrát jsem dozimetry umístila po obvodu interakční komory. Tři kusy elektronických a termoluminiscenčních dozimetrů jsem umístila do interakční komory. Elektronické filmové dozimetry jsem před umístěním musela obalit do aluminiové folie z důvodu silného magnetického pole, které se v době výstřelu v komoře vytvoří a mohlo by nenávratně poškodit elektronické zařízení nacházející se uvnitř dozimetrů.

U prvního experimentu byly dozimetry umístěny po dobu 26 dní. Druhý experiment trval 10 dní.

Vyhodnocení elektronických dozimetrů probíhalo v laboratoři na Zdravotně sociální fakultě za pomoci čtečky pro tento dozimetr. Ostatní dozimetry byly vyhodnoceny za účasti Fyzikálního ústavu AV ČR.

Výsledky byly poté zpracovány do přehledných tabulek v excelu, kde byly zaznamenány hodnoty  $H_p$  i  $H_s$  v microSievertch.

Tyto výsledky nám poté posloužily jako data pro statistické zpracování této studie.

## **2.2.1 Charakteristika použitých dozimetrů**

### Osobní filmový dozimetr

Filmový dozimetr zobrazuje informace o osobním dávkovém ekvivalentu fotonového záření a elektronů, druhu a energii záření, směru a časovém rozložení ozáření a o případné kontaminaci. Dozimetr se skládá z dozimetrické kazety s kompenzačními filtry a dozimetrického filmu. Dozimetrický film je z obou stran překryt sadou filtrů tvořených zpravidla Cu, Al, Pb, Sn, apod. Závislost odezvy filmového dozimetru na energii fotonů a elektronů dovoluje, aby při použití části nestíněného filmu a vhodné sady absorpčních filtrů byl z něj získán vícesložkový dozimetr. Na základě vyhodnocení zčernání filmu pod nestíněnou plochou a pod jednotlivými filtry je možno určit požadovanou dozimetrickou veličinu;

v intervalu v praxi se běžně vyskytujících energií (řádově do několika 102 keV) fotonů lze získat i s jistou informací o energetické distribuci této veličiny. V řadě radiačních polí lze odhadnout množství ozáření přímo pomocí odezvy filmového dozimetru pod Pb filtrem. Naopak v polích záření beta a v nízkoenergetických rtg polích je využita kombinace odezvy nestíněného filmu a odezvy pod nejtenčími (Cu) filtry. Pro vyšší energie fotonů (větší než 100 keV) lze při použití filtru z látky o vysokém Z (zpravidla Pb) a o různé velikosti na jednotlivých stranách filmu určit i směr ozáření osoby.<sup>[39]</sup>

### **Technické parametry filmového dozimetru CSOD:**

Dozimetrický film: Foma Personal Monitoring Film

Dozimetrická kazeta: filmová kazeta CSOD

Měřené veličiny:

- osobní dávkový ekvivalent  $H_p(10)$
- osobní dávkový ekvivalent  $H_s(0,07)$
- z veličiny  $H_p(10)$  a stanovené energie záření se počítá efektivní dávka E (dle ICRP 74)
- veličina  $H_s(0,07)$  udává ekvivalentní dávku  $H_T$

Rozsah měření: 0,05 mSv – 2,0 Sv

Nejistota měření: do  $\pm 25 \%$  (v rozsahu 0,3 mSv – 2,0 Sv)

pod 0,3 mSv nejistota vzrůstá, u 0,1 mSv nepřevýší  $\pm 50 \%$

Příkon dávkového ekvivalentu: bez omezení

Rozsah energií záření:

- 10 keV – 15 MeV pro fotonové záření (záření rtg a gama)
- 0,5 MeV – 15 MeV pro elektrony
- tepelné neutrony (měření vyžaduje použití upravených kazet)



Rozsah pracovních teplot: 0 až 45 °C (film nesmí zmrznout – nutno zajistit při práci venku v zimě).<sup>[41]</sup>

Pro dosažení uvedených vlastností je nutné zajistit, aby filmový dozimetr byl umístěn na interakční komoře tak, aby okénko (otvor v kazetě) bylo nasměřováno k obalu interakční komory

### Termoluminiscenční dozimetry

Termoluminiscenční dozimetry jsou vhodné krystalické látky, ve kterých ionizující záření vyvolává excitace a zachycení elektronů v energeticky vyšších stavech. Při zahřátí jsou zachycené elektrony uvolňovány. Látka vyzařuje světlo a jeho celková energie je úměrná energii ionizujícího záření pohlceného v látce. Detekce vyzářené energie se zpravidla uskutečňuje scintilačními detektory. Používají se různé druhy TL-materiálů. Mezi nejznámější patří LiF, CaF<sub>2</sub>, MgBeO<sub>4</sub>, BeO, apod.<sup>[40]</sup>

### **Technické parametry termoluminiscenčního dozimetru:**

Měřená veličina: osobní dávkový ekvivalent  $H_p(10)$

$$\text{efektivní dávka } E = H_p(10) \times 0,9 \text{ (dle ICRP 74)}$$

Rozsah měření: 0,2 mSv – 10 Sv s nejistotou do  $\pm 25 \%$

Hodnoty nižší než 0,2 mSv nejsou vzhledem k nejistotě měření ve výsledcích uváděny, od hodnoty 0,05 mSv se však uchovávají pro roční hodnocení efektivní dávky  $E$ , pro kterou platí  $E = H_p(10) \times 0,9$

Rozsah záření: 30 keV – 15 MeV pro fotonové záření (záření rtg a gama)<sup>[41]</sup>

## Osobní elektronický dozimetr DMC 2000 XB

DMC 2000 XB umožňuje současné měření hloubkového dávkového ekvivalentu  $H_p(10)$  a mělkého dávkového ekvivalentu  $H_s(0,07)$  pro X a  $\beta$  záření. Může být také použit jako provozní dozimetrický systém pro veškerá posuzování zdravotnických rizik včetně radiologických expozic a najde uplatnění i ve výrobních závodech radioaktivních zářičů, jaderných elektrárnách a dalších jaderných zařízeních.

### **Technické parametry elektronického dozimetru DMC 2000 XB:**

Fyzikální vlastnosti:

měřicí rozsah:

- dávka 1  $\mu\text{Sv}$  až 10 Sv
- dávkový příkon 0,1  $\mu\text{Sv/h}$  až 10 Sv/h
- zobrazení dávky 1  $\mu\text{Sv}$  až 10 Sv
- zobrazení příkonu 0,01 mSv/h až 10 Sv/h

linearita:  $< \pm 10\%$  až do 1 Sv/h

$< \pm 25\%$  až do 10 Sv/h

pro X,  $\gamma > 60 \text{ keV}$  a  $\beta$

$< \pm 25\%$  až do 3 Sv/h

pro X  $< 60 \text{ keV}$

energetický rozsah:

- X a  $\gamma$ : 20 keV až 6 MeV
- $B_{\text{Emax}} > 60 \text{ keV}$  ( $E_{\text{max}}$  : 0,22 MeV až 2,3 MeV)

přesnost:

$< \pm 10\%$  \*\* (137Cs při 30 mSv/h)

### Elektrické vlastnosti

standardní baterie LiMnO<sub>2</sub>, CR2450, životnost > 1 rok (8 hod/den) nebo 6 měsíců nepřetržitého provozu

### Mechanické vlastnosti

rozměry: 84 x 48 x 17,5 mm

hmotnost: < 70 g (s baterií)

uchycení na oděv za vyměnitelný klip

### Vliv okolního prostředí

teplotní rozsah: -10°C až + 50°C, pracovní

vlhkost: < 90% při 42°C

skladování: -30°C až + 71°C

odolný vůči nárazům, vibracím a pádům, vodotěsný IP53.<sup>[42]</sup>

### Osobní elektronický dozimetr Thermo scientific EPD MK2

Elektronický dozimetr Thermo scientific EPD MK2 je vhodný pro použití jako standardní elektronický osobní dozimetr – určený pro veřejné služby, výzkumné laboratoře a kanceláře. Displej a funkce jsou řízeny jediným tlačítkem. Baterie se nachází pod robustním krytem.

### **Technické parametry Thermo scientific EPD MK2**

Citlivost pro X a gama záření a  $\beta$  částice

Měřená veličina: Osobní dávkový ekvivalent  $H_p(10)$

Osobní dávkový ekvivalent  $H_s(0,07)$

Přímý odečet dávkových ekvivalentů  $H_p(10)$  a  $H_s(0,07)$

Rozsah měření: 0 mSv až > 16 Sv (0 mrem až > 1600 rem)

Jednotky zobrazení: Sv a rem

Baterie: tužková baterie AA (napětí baterie zobrazeno na displeji) – životnost 40 – 50 dnů v režimu ON.

Zvukový i vizuální LED alarm

Rozměry: 85 x 63 x 19 mm (3,3 "x 2,5" x 0,8 ")

Hmotnost: 95 g včetně baterie

Provozní teplota: -10 ° C až +50 ° C (+14 ° F až +122 ° F)

Vlhkost: 20% až 90% <sup>[43]</sup>

### **2.2.2 Charakteristika použitého laseru**

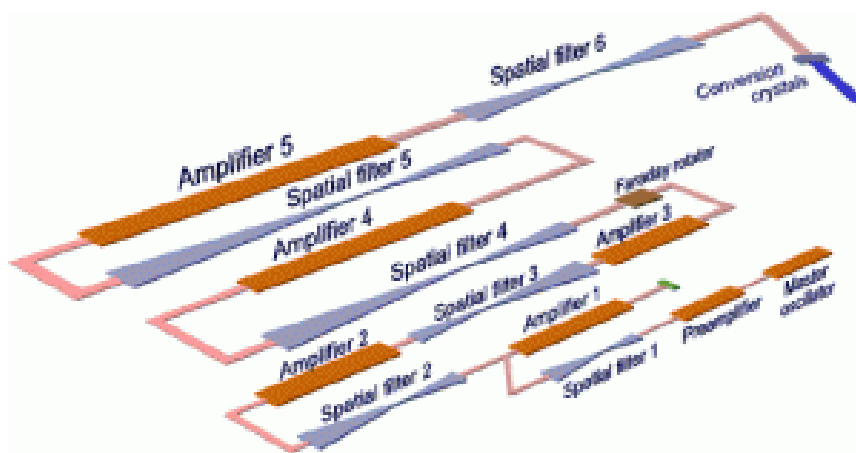
PALS je jednosvazkový laserový systém, který se skládá z oscilátorové sekce generující počáteční slabý světelný pulz, a z řetězce pěti laserových zesilovačů, jenž tento pulz postupně zesilují. Takové schéma uspořádání se nazývá “master oscillator – power amplifiers” (MOPA), neboli řídicí oscilátor – výkonové zesilovače. Velikost zesilovačů se od jednoho zesilovacího stupně k druhému zvětšuje, tudíž se postupně zvětšuje i průměr zesilovaného laserového (od počátečních 8 mm až na koncových 290 mm). Tím se udržuje plošná hustota výkonu laserového svazku na hodnotě, při níž ještě nedojde k poškození povrchu jednotlivých optických prvků vlivem velké světelné zátěže. Průměru laserového svazku se dosahuje pomocí vložených optických teleskopů – prostorových filtrů, které současně zlepšují kvalitu zesilovaného svazku. Dalším důležitým zařízením v zesilovací trase je Faradayův rotátor zabraňující zpětnému

zesilování odražených paprsků, které by jinak mohlo vést k poškození počátečních zesilovacích stupňů laseru.

Hlavní laserový svazek o průměru 290 mm po průchodu šestým prostorovým filtrem míří do interakční komory. Zde je optickou fokusační soustavou soustředěn na terčík. Velikost ohniskové skvrny na terčíku může být menší než 0,1 mm. Hustota světelného výkonu v ohnisku pak docílí vysokých hodnot (až  $10^{16}\text{W/cm}^2$ ), takže jakákoliv látka se zde může změnit ve žhavou ionizovanou hmotu – plazmu – o teplotě až milióny stupňů. A právě toto laserem vytvářené plasma je základním předmětem zkoumání.

Pomocný svazek o průměru 148 mm a energii do 100 J, se získává odštěpením části hlavního svazku za čtvrtým zesilovačem pomocí polopropustného zrcadla. Zpoždění vedlejšího svazku vůči hlavnímu svazku lze měnit pomocí optických zpožďovacích linek.

Diagnostický svazek, který se obdobně získává a má ještě menší průměr a energii do 10 J, je potřebný pro sondování a měření parametrů plazmatu vytvářeného hlavním laserovým paprskem. Diagnostický svazek většinou konvertuje do červené nebo modré barvy.<sup>[2]</sup>



Obrázek 7: Celková uspořádání. Zdroj:<sup>[2]</sup>



Obrázek 8: Uspořádání oscilátorové sekce se zesilovači. Zdroj: Vlastní výzkum

### Interakční hala

Interakční hala je vybavena dvojitou vakuovou interakční komorou. Do obou částí komory lze zavádět různé kombinace laserových svazků, na základní frekvenci i na jejích harmonických frekvencích, a pomocí fokusačních optických systémů je koncentrovat na terčik do bodového (kruhového) nebo lineárního (v jednom směru protáhlého) ohniska.

K práci experimentátorů je přizpůsobena zvláštní ovládací místnost, komunikačně propojená s hlavním velínem laseru, a počítačová místnost pro sběr a zpracování experimentálních dat. K základnímu vybavení interakčních prostor náleží systémy dálkového ovládaní vakuových čerpacích zařízení interakční komory systému justování terčíku a fokusační optiky a dále soubor zařízení pro optickou, rentgenovou a iontovou diagnostiku laserového plazmatu.<sup>[2]</sup>



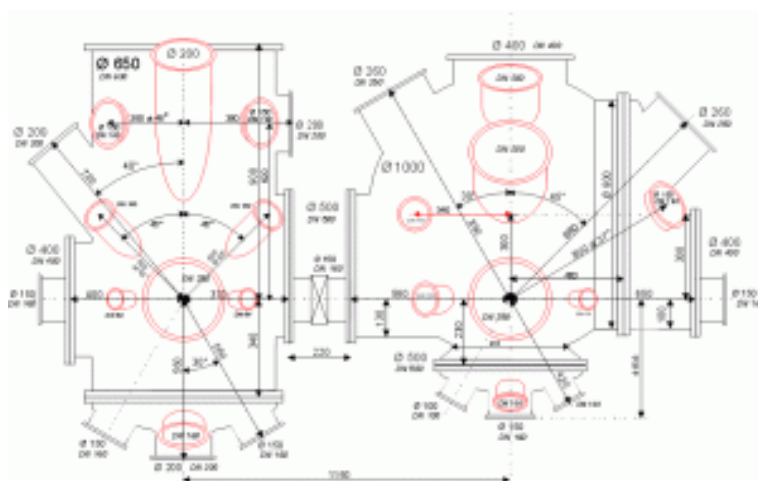
Obrázek 9: Interakční hala. Zdroj: Vlastní výzkum

### Interakční komory

Dvojitá interakční komora PALSu představuje jeden technický celek. Její části však mohou být použity samostatně a mohou v nich být prováděny vzájemně nezávislé experimenty. Obě části komory jsou sestaveny s ohledem na nejrůznější současné i budoucí experimenty s výkonovými laserovými svazky a s laserovým plazmatem.

Hlavní komora (vlevo) obsahuje vakuovou kulovou sekci z nerezové oceli o průměru 100 cm, vybavenou 80-cm eliptickým víkem, které slouží jako hlavní vstupní dveře. Víko je opatřeno pneumatickými uzamykatelnými mechanismy zajišťující jednak rychlý přístup do vnitřku komory po jejím napuštění, jednak vakuovou těsnost při jejím vyčerpávání. Další vstup do komory o průměru 50-cm, opatřený rovněž vakuovým závěsným víkem, se nachází naproti vstupnímu oknu pro hlavní laserový svazek. Pro diagnostiku a justáž je na komoře dále k dispozici celkem 15 dalších vstupů s přírubami o průměru od 64 mm do 500 mm. Stejně jako hlavní komora je také tato část opatřena závěsnými dveřmi s pneumatickými zámky. Pomocná komora může být vakuově spojena s hlavní komorou nebo může být provozována nezávisle. Pomocí vakuových vlnovců a nastavných potrubí lze změnit vzdálenost spojených komor

v rozmezí od 95 cm až do několika metrů. Změna vzdáleností komor je ulehčena systémem vodících kolejí, které jsou zapuštěny do podlahy interakční haly. Vedle vstupního okna pro laserový svazek a hlavního čerpacího hrdla se nachází na pomocné komoře dalších 18 menších přírub, které ulehčují připojení nejrůznějších měřicích zařízení.<sup>[2]</sup>



Obrázek 10: Interakční komory (Levá: Komora 1, Pravá: Komora 2). Zdroj:<sup>[2]</sup>

V obou komorách se nachází interní fokusační optika, mikrometrické posuvné stolky nesoucí terčik a dále i veškerá další optická zařízení montována na optických lavicích, která jsou upevněna přímo k podlaze haly a od stěn komory mechanicky oddělena speciálním vlnovcovým systémem. Tím je zabezpečena dokonalá stabilita vnitřních optických systémů obou komor, neboť deformace pláště komory při jejím napouštění a čerpání se na optické lavice nemohou přenést.

Terčové komory včetně vnitřního mechanického vybavení byly vytvořeny Jean Claude Lagronem a Miroslavem Hudečkem.

Model laserového systému je ve zmenšené podobě umístěn v suterénu budovy Prague asterix laser systém v Praze (viz. fotografie v příloze 1).



### 2.2.3 Rozmístění dozimetrů

#### Experiment č. 1

První experiment probíhal od 21. října do 18. listopadu. Dozimetry byly umístěny 24. října z důvodu instalace ostatních zařízení a nastavování laseru.

Elektronické osobní dozimetry jsou označeny výrobními čísly, pro snazší práci jsem k těmto číslům přiřadila čísla 1-11. Dozimetry 1-10 byly typu DMC 2000 XB a Dozimetr č. 11 byl elektronický dozimetr Thermo, zapůjčený od p. Ing. Olšovcové. Filmové dozimetry již označení čísla měly.

Interakční komory jsem si označila čísky jedna a dva. Experiment byl prováděn pouze na komoře 1.

Rozmístění jednotlivých dozimetrů je zaznačeno na plánu interakční haly, který mi byl poskytnutý Badatelským centrem. Oranžové tečky na plánu jsou elektronické dozimetry, modré filmové dozimetry. Plánek rozmístění je na obrázku 11.

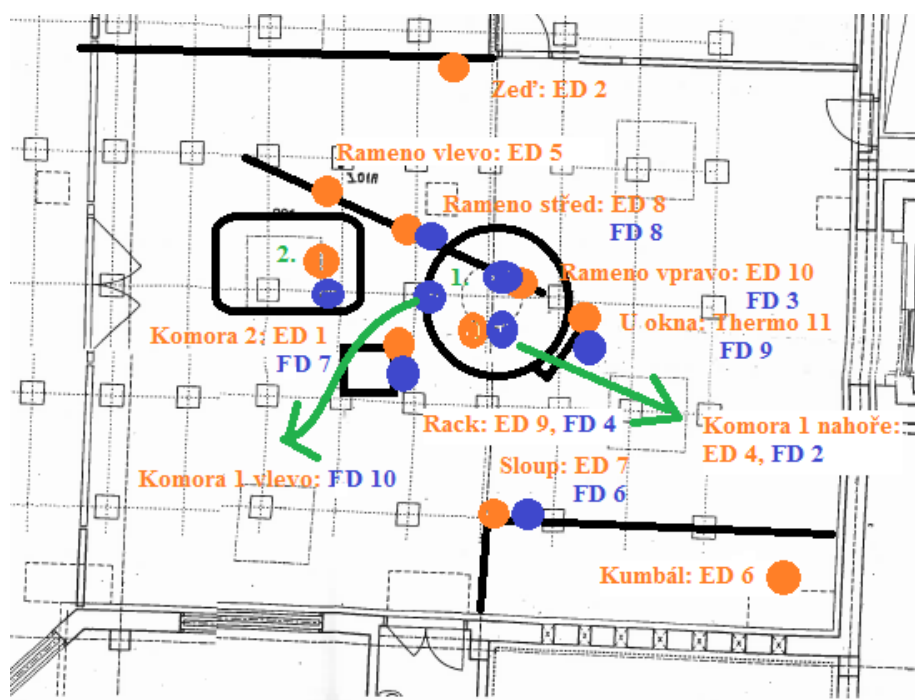
Rozmístění jednotlivých dozimetrů jsem pro přehlednější zobrazení zaznačila také do tabulky 1. V levém sloupci jsou místa uložení dozimetrů, v prostředním sloupci jsou čísla, kterými jsem si označila elektronické dozimetry a v závorkách jsou jejich zkrácena výrobní čísla. V pravém sloupci jsou čísla filmových dozimetrů.

Tabulka 1: Rozmístění dozimetrů

Umístění dozimetrů	Elektronický dozimetr (ED)	Filmový dozimetr (FD)
Velín	3 (48L2)	-
Zed'	2 (51L2)	-
Komora 2	1 (17L2)	7
Komora 1 - nahoře	4 (65L2)	2
Rameno vlevo	5 (82L2)	-
Rameno střed	8 (97L2)	8

Rameno vpravo	10 (95L2)	3
Stojan na el. zař. (RACK)	9 (46L2)	4
Kumbál	6 (27L2)	-
Sloup	7 (67L2)	6
Komora 1 - uvnitř	-	1
Komora 1 - uvnitř	-	5
Komora 1 - vlevo	-	10
Komora 1 – u okna	11 (Thermo)	9

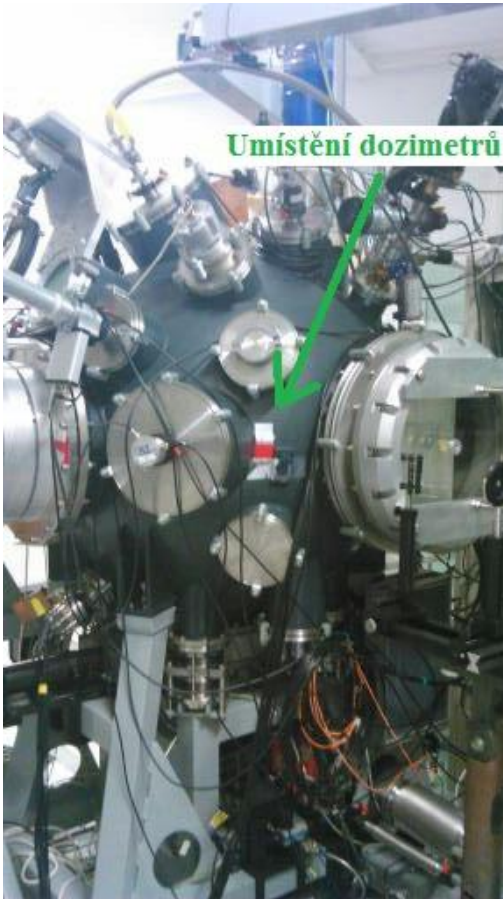
Zdroj: Vlastní výzkum



Obrázek 11: Plánek rozmístění dozimetřů při prvním experimentu. Zdroj: Vlastní výzkum



Obrázek 12: Umístění dozimetrů na interakční komoře (komora 1 nahoře: ED4, FD 2).  
Zdroj: Vlastní výzkum



Obrázek 13: Umístění dozimetrů na interakční komoře. Zdroj: Vlastní výzkum

Další fotografie z rozmístování dozimetrů v interakční hale jsou v příloze 2, 3, 4 a 5.

## Experiment č. 2

Druhý experiment probíhal od 2. června do 13. června. Dozimetry byly umístěny 5. června ze stejného důvodu jako u prvního experimentů.

Při druhém experimentu byly použity opět osobní elektronické dozimetry DMC 2000 XB společně s termoluminiscenčními dozimetry. Elektronické dozimetry jsem si označila čísly 1-10, (dozimetr číslo 8 byl nefunkční – z tohoto důvodu nebyl umístěn na komoru), k těmto dozimetrům jsem si zapůjčila elektronický dozimetr Thermo. Termoluminiscenční dozimetry jsem vložila po 4 kusech do uzavíratelného sáčku a označila je čísly 1-7.



Obrázek 14: Termoluminiscenční dozimetry. Zdroj: Vlastní výzkum

Sáčky s termoluminiscenčními dozimetry jsem poté umístila (přilepila) k elektronickým osobním dozimetrům. Osobní elektronické dozimetry společně s termoluminiscenčními byly u druhého experimentu umístěny také do komory. Z toho důvodu byly obaleny v aluminiové folii.

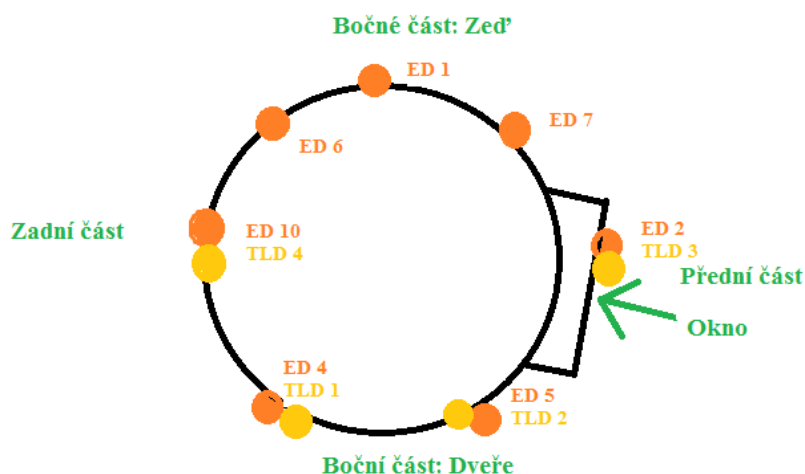
U druhého experimentu jsem umístila dozimetry na interakční komoru 1. po celém jejím obvodu. Pro lepší orientaci uvádím opět rozmístění dozimetrů v tabulce 2 a na zjednodušeném nákresu interakční komory (viz obrázek 12).

V levém sloupci uvádím přibližné umístění dozimetrů na interakční komoře, v prostředním sloupci jsou čísla elektronických dozimetrů a jejich zkrácená výrobní čísla. V pravém sloupci jsou čísla termoluminiscenčních dozimetrů. V plánu jsem elektronické osobní dozimetry označila oranžovými tečkami, termoluminiscenční dozimetry jsou žluté tečky.

Tabulka 2: Umístění dozimetrů

Umístění dozimetrů	Elektronický dozimetr (ED)	Termoluminiscenční dozimetr (TLD)
Zadní část komory – vpravo	10 (64L2)	4
Zadní část komory – vlevo	6 (65L2)	-
Přední část komory - okno	2 (46L2)	3
Boční strana komory (dveře) – vpravo	5 (80L2)	2
Boční strana komory (dveře) – vlevo	4 (10L2)	1
Boční strana komory (zeď) – vpravo	1 (17L2)	-
Boční strana komory (zeď) - vlevo	7 (95L2)	-
Uvnitř komory - okno	3 (14L2)	5
Uvnitř komory – vlevo	9 (55L2)	7
Uvnitř komory – vpravo	11 (Thermo)	6

Zdroj: Vlastní výzkum



Obrázek 15: Umístění dozimetřů na interakční komoře. Zdroj: Vlastní výzkum



Obrázek 16: Umístění dozimetřů (Zadní část komory vpravo: ED 10, TLD 4). Zdroj: Vlastní výzkum

#### 2.2.4 Vyhodnocení dávky

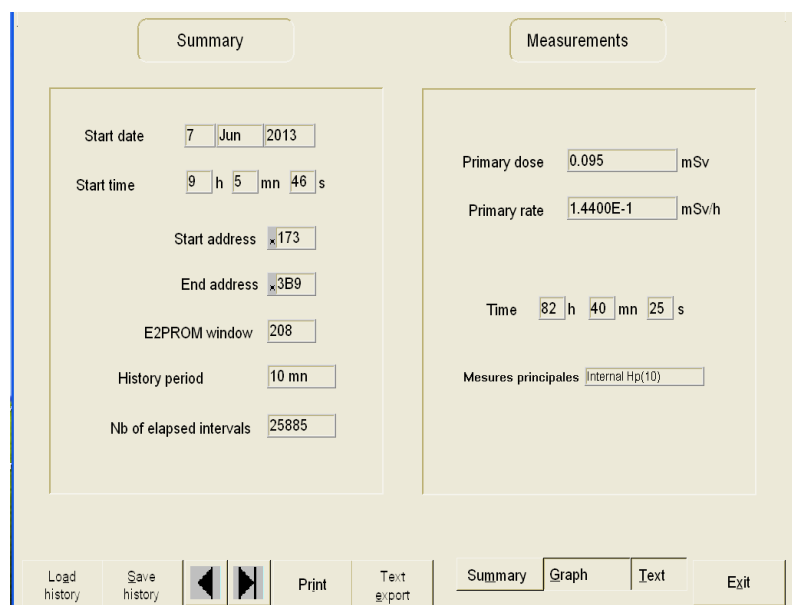
Vyhodnocení  $H_p$  a  $H_s$  dávky u elektronických osobních dozimetřů DMC 200 XB jsem prováděla pomocí hands free čtečky LDM 220 a softwarové aplikace DosiFast. Toto vybavení jsem měla k dispozici v laboratoři na Zdravotně sociální fakultě.

Dozimetry jsem jeden po druhém přikládala ke čtečce a v softwarové aplikaci si otevřela historii měření. Následně se otevřelo okno, v němž byla celková naměřená

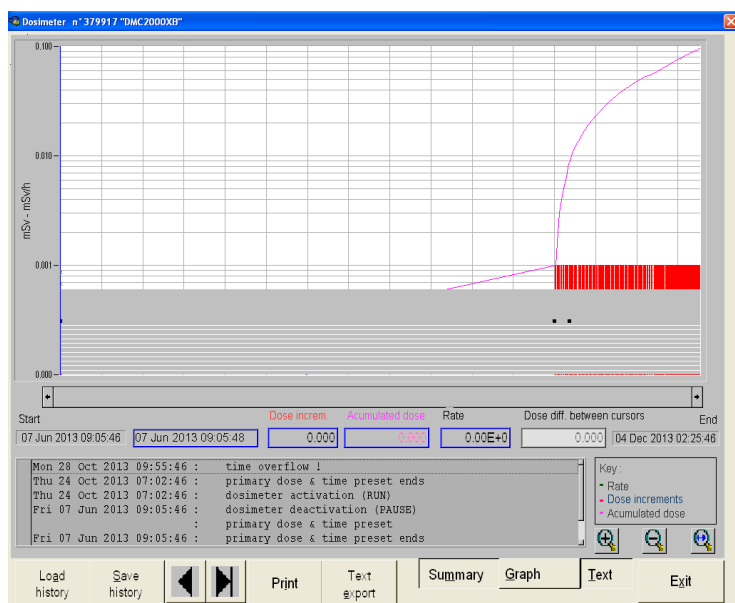
dávka, historie dávek za celé období a grafické znázornění. Tyto hodnoty jsem postupně zanesla do tabulek v excelu.<sup>[44]</sup>



Obrázek 17: Čtečka LDM 220 a Elektronický osobní dozimetr DMC 2000 XB.  
Zdroj:<sup>[44]</sup>



Obrázek 18: DosiFast. Zdroj: Vlastní výzkum



Obrázek 19: DosiFast. Zdroj: Vlastní výzkum

Filmové osobní dozimetry byly odeslány k vyhodnocení do společnosti CSOD (Celostátní služba osobní dozimetrie). Zde došlo k odečtení výsledků z filmových dozimetrů a zpracované údaje byly zpět odeslány na Fyzikální ústav AV ČR.

Výsledky z termoluminiscenčních dozimetrů mi vyhodnocovali pracovníci Fyzikálního ústavu AV ČR ve svých laboratořích.

### 2.2.5 Zpracování výsledků

Výsledky měření z obou typů osobních dozimetrů jsem poté zpracovala pomocí tabulek v programu MS Excel. Při statistickém zpracování jsem počítala aritmetický průměr, rozptyl a směrodatnou odchylku.

Pro výpočet **aritmetického průměru** jsem použila vzoreček.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i n_i$$



Dané naměřené hodnoty jsem nejprve sečetla a součet jsem vydělila počtem měření.

Pro výpočet **rozptylu** jsem nejprve vypočítala rozdíl mezi všemi naměřenými hodnotami a průměrem umocněným na druhou. Všechna tato čísla jsem poté sečetla a výsledek vydělila počtem měření sníženým o 1.

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 n_i$$

Odmocněním získané hodnoty (rozptylu) jsem vypočítala **směrodatnou odchylku**.<sup>[45]</sup>

$$S_x = \sqrt{\sigma^2}$$

Výsledné údaje jsem navzájem porovnála a poté jsem určila možnosti použití elektronických filmových dozimetřů při práci s lasery.

### 3. VÝSLEDKY

#### Experiment č. 1

Tabulka 3: Naměřené hodnoty z elektronických dozimetrů pro osobní dávkový ekvivalent  $H_p(10)$  v jednotlivých dnech v  $\mu\text{Sv}$

	ED1	ED 2	ED 3	ED4	ED6	ED7	ED8	ED9	ED10	Thermo
24. 10.	1	2	4	2	1	x	2	3	2	4
25. 10.	2	3	4	2	2	2	2	3	1	2
26. 10.	2	3	4	3	2	3	3	3	2	3
27. 10.	2	2	5	2	2	2	2	3	2	2
28. 10.	2	2	4	3	2	3	2	3	4	1
29. 10.	2	2	5	2	2	2	3	3	4	3
30. 10.	2	3	4	2	1	3	2	3	2	5
31. 10.	2	2	5	2	2	2	2	3	2	5
01. 11.	2	3	4	2	2	2	3	3	1	4
02. 11.	2	2	5	2	2	3	2	3	2	4
03. 11.	2	2	4	2	2	3	2	3	2	3
04. 11.	2	4	4	2	2	2	3	3	2	5
05. 11.	2	2	5	5	1	3	2	3	2	3
06. 11.	2	2	5	2	2	2	3	3	2	4
07. 11.	2	2	5	3	2	3	2	3	1	3
08. 11.	2	2	5	2	2	2	2	4	2	4
09. 11.	2	3	4	2	1	3	2	3	2	3
10. 11.	2	3	5	3	2	3	2	3	2	3
11. 11.	2	2	4	2	2	2	2	3	2	4
12. 11.	2	3	4	2	1	2	3	3	2	3
13. 11.	2	2	5	2	2	3	2	3	2	3
14. 11.	2	2	4	2	2	2	2	2	2	4
15. 11.	2	3	5	2	2	3	3	3	1	2
16. 11.	2	2	3	2	2	2	2	3	2	1
17. 11.	2	2	4	2	1	2	2	3	2	2
18. 11.	2	2	4	3	2	3	2	3	1	4
<b>Suma</b>	<b>51</b>	<b>62</b>	<b>114</b>	<b>60</b>	<b>46</b>	<b>62</b>	<b>59</b>	<b>78</b>	<b>51</b>	<b>84</b>

Zdroj: Vlastní výzkum

Tabulka 4: Naměřené hodnoty z elektronických dozimetrů pro osobní dávkový ekvivalent  $H_s(0,07)$  v jednotlivých dnech v  $\mu\text{Sv}$

	ED1	ED 2	ED 3	ED4	ED6	ED7	ED8	ED9	ED10	Thermo
24. 10.	2	3	4	7	3	4	3	6	3	6
25. 10.	4	4	6	8	3	4	4	6	2	7
26. 10.	4	4	6	8	3	3	3	5	3	3
27. 10.	3	3	7	8	2	2	3	2	3	3
28. 10.	3	4	6	10	3	4	5	8	2	3
29. 10.	4	5	5	12	4	5	3	9	2	5
30. 10.	5	4	6	9	7	5	3	12	2	6
31. 10.	4	4	3	9	5	4	4	10	3	6
01. 11.	3	5	3	9	7	3	3	9	2	7
02. 11.	3	3	6	9	3	4	6	8	4	4
03. 11.	2	3	6	6	3	3	3	4	4	4
04. 11.	5	6	6	4	5	3	3	8	4	7
05. 11.	6	3	7	11	6	2	3	8	4	6
06. 11.	4	5	6	11	7	4	5	11	2	8
07. 11.	4	4	7	8	6	3	4	9	4	8
08. 11.	5	3	6	9	8	3	4	6	5	7
09. 11.	3	4	6	9	9	3	4	9	4	3
10. 11.	3	3	6	6	6	3	4	4	3	3
11. 11.	6	3	7	10	5	2	3	5	3	8
12. 11.	4	6	8	12	7	2	6	12	4	7
13. 11.	4	6	9	12	6	4	4	9	2	5
14. 11.	3	5	9	10	3	3	5	9	3	4
15. 11.	6	6	6	8	3	5	3	11	3	3
16. 11.	3	3	6	7	6	4	4	9	2	3
17. 11.	3	4	5	6	3	3	3	9	3	3
18. 11.	6	5	5	10	4	3	3	6	4	4
Suma	102	108	157	228	127	88	98	204	80	133

Zdroj: Vlastní výzkum

Pozn. Tabulka 3 a 4: Rozmístění dozimetrů je podrobněji uvedeno v metodice společně s plánkem interakční haly

Tabulka 5: Naměřené hodnoty z filmových dozimetrů za celou dobu experimentu v  $\mu\text{Sv}$

	FD 1	FD 2	FD 3	FD 4	FD 5	FD 6	FD 7	FD 8	FD 9	FD 10
X záření	3160	<10	<10	<10	3780	<10	<10	<10	<10	<10
$\gamma$ záření	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100

Zdroj: Vlastní výzkum

Pozn. Tabulka 5. Rozmístění filmových dozimetrů je uvedeno v metodice společně s plánkem interakční haly

Tabulka 6: Naměřené hodnoty z elektronických dozimetrů pro osobní dávkový ekvivalent  $H_p(10)$  v jednotlivých dnech na 1 výstřel v  $\mu\text{Sv}$

	Výstřely	ED 1	ED 2	ED 3	ED4	ED6	ED7	ED8	ED9	ED10	Thermo
24. 10.	3	0,33	0,66	1,33	0,67	0,33	x	0,67	1	0,67	1,33
25. 10.	9	0,22	0,33	0,44	0,22	0,22	0,22	0,22	0,33	0,11	0,22
29. 10.	10	0,2	0,2	0,5	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,3
30. 10.	11	0,18	0,27	0,36	0,18	0,09	0,27	0,18	0,27	0,18	0,45
31. 10.	12	0,17	0,17	0,42	0,17	0,17	0,17	0,17	0,25	0,17	0,42
01. 11.	12	0,17	0,25	0,33	0,17	0,17	0,17	0,25	0,25	0,08	0,33
04. 11.	13	0,15	0,31	0,31	0,15	0,15	0,15	0,23	0,23	0,15	0,38
05. 11.	9	0,22	0,22	0,56	0,56	0,11	0,33	0,22	0,33	0,22	0,33
06. 11.	10	0,2	0,2	0,5	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,4
07. 11.	14	0,14	0,14	0,36	0,21	0,14	0,21	0,14	0,21	0,07	0,21
08. 11.	8	0,25	0,25	0,63	0,25	0,25	0,25	0,25	0,5	0,25	0,5
11. 11.	10	0,2	0,2	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,4
12. 11.	9	0,22	0,33	0,45	0,22	0,11	0,22	0,33	0,33	0,22	0,33
13. 11.	6	0,33	0,33	0,83	0,33	0,33	0,5	0,33	0,5	0,33	0,5
14. 11.	14	0,14	0,14	0,29	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,29
15. 11.	10	0,2	0,3	0,5	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1	0,2
18. 11.	5	0,4	0,4	0,8	0,6	0,4	0,6	0,4	0,6	0,2	0,44
<b>Suma</b>	<b>165</b>	<b>3,72</b>	<b>4,7</b>	<b>9,01</b>	<b>4,67</b>	<b>3,41</b>	<b>4,13</b>	<b>4,63</b>	<b>6,14</b>	<b>3,69</b>	<b>7,03</b>

Zdroj: Vlastní výzkum

Tabulka 7: Naměřené hodnoty z elektronických dozimetrů pro osobní dávkový ekvivalent  $H_s(0,07)$  v jednotlivých dnech na 1 výstřel v  $\mu\text{Sv}$

	Výstřely	ED1	ED 2	ED 3	ED4	ED6	ED7	ED8	ED9	ED10	Thermo
24. 10.	3	0,67	1	1,33	2,33	1	1,33	1	2	1	2
25. 10.	9	0,45	0,45	0,67	0,89	0,33	0,45	0,45	0,67	0,22	0,78
29. 10.	10	0,4	0,5	0,5	1,2	0,4	0,5	0,3	0,9	0,2	0,5
30. 10.	11	0,45	0,36	0,55	0,82	0,64	0,45	0,27	1,09	0,18	0,56
31. 10.	12	0,33	0,33	0,25	0,75	0,42	0,33	0,33	0,83	0,25	0,5
01. 11.	12	0,25	0,42	0,25	0,75	0,58	0,25	0,25	0,75	0,17	0,58
04. 11.	13	0,38	0,46	0,46	0,31	0,38	0,23	0,23	0,62	0,31	0,54
05. 11.	9	0,67	0,33	0,78	1,22	0,67	0,22	0,33	0,89	0,45	0,67
06. 11.	10	0,4	0,5	0,6	1,1	0,7	0,4	0,5	1,1	0,2	0,8
07. 11.	14	0,29	0,29	0,5	0,57	0,43	0,21	0,29	0,64	0,29	0,57
08. 11.	8	0,63	0,38	0,75	1,13	1	0,38	0,5	0,75	0,63	0,88
11. 11.	10	0,6	0,3	0,7	1	0,5	0,2	0,3	0,5	0,3	0,8
12. 11.	9	0,44	0,67	0,89	1,33	0,78	0,22	0,67	1,33	0,44	0,78
13. 11.	6	0,66	1	1,5	2	1	0,67	0,67	1,5	0,33	0,83
14. 11.	14	0,21	0,36	0,64	0,71	0,21	0,21	0,36	0,64	0,21	0,29
15. 11.	10	0,6	0,6	0,6	0,8	0,3	0,5	0,3	1,1	0,3	0,3
18. 11.	5	1,2	1	1	2	0,8	0,6	0,6	1,2	0,8	0,8
<b>Suma</b>	<b>165</b>	<b>8,63</b>	<b>8,95</b>	<b>11,97</b>	<b>18,91</b>	<b>10,14</b>	<b>7,15</b>	<b>7,35</b>	<b>16,51</b>	<b>6,28</b>	<b>12,18</b>

Zdroj: Vlastní výzkum

Tabulka 8: Počet výstřelů v jednotlivých dnech a průměrná energie v kJ vztažená na 1 výstřel.

	Počet výstřelů/den	Průměrná energie kJ/výstřel
24. 10.	3	0,649
25. 10.	9	0,567
29. 10.	10	0,578
30. 10.	11	0,538
31. 10.	12	0,591
01. 11.	12	0,6
04. 11.	13	0,678
05. 11.	9	0,575
06. 11.	10	0,587
07. 11.	14	0,606
08. 11.	8	0,523
11. 11.	10	0,59
12. 11.	9	0,509
13. 11.	6	0,678
14. 11.	14	0,623
15. 11.	10	0,561
18. 11.	5	0,599
Minimum	3	0,509
Maximum	14	0,678

Zdroj: Vlastní výzkum

## Experiment č. 2

Tabulka 9: Naměřené hodnoty z elektronických dozimetrů pro osobní dávkový ekvivalent  $H_p(10)$  v jednotlivých dnech v  $\mu\text{Sv}$

	ED1	ED2	ED 3	ED4	ED5	ED6	ED7	ED9	ED10	Thermo
04. 6.	x	2	1	2	2	x	x	3	3	5
05. 6.	x	3	2	2	4	x	x	4	5	6
06. 6.	2	3	5	3	4	2	2	6	6	6
07. 6.	2	2	2	2	3	2	2	3	2	3
08. 6.	2	3	3	2	2	3	2	3	3	2
09. 6.	1	3	5	2	4	2	3	3	4	5
10. 6.	2	2	6	3	4	3	4	5	5	5
11. 6.	1	3	7	2	5	2	2	5	6	6
12. 6.	2	3	6	2	5	2	3	7	4	8
13. 6.	2	2	4	3	5	2	2	4	3	6
Suma	14	26	41	23	38	18	20	43	41	52

Zdroj: Vlastní výzkum

Tabulka 10: Naměřené hodnoty z elektronických dozimetrů pro osobní dávkový ekvivalent  $H_s(0,07)$  v jednotlivých dnech v  $\mu\text{Sv}$

	ED 1	ED2	ED 3	ED 4	ED 5	ED 6	ED7	ED9	ED 10	Thermo
04. 6.	x	3	4	3	3	x	x	5	4	6
05. 6.	x	4	6	2	5	x	x	7	4	10
06. 6.	3	3	8	4	5	3	4	7	6	8
07. 6.	3	3	3	2	4	3	3	3	3	4
08. 6.	3	3	4	2	3	4	4	4	3	5
09. 6.	2	5	9	3	4	5	4	9	5	11
10. 6.	3	4	8	3	6	5	4	8	6	9
11. 6.	3	4	12	5	5	3	3	9	9	11
12. 6.	2	4	12	4	6	4	5	9	7	12
13. 6.	2	4	8	3	6	2	3	8	8	9
Suma	21	37	74	31	47	29	30	69	55	85

Zdroj: Vlastní výzkum



Tabulka 11: Naměřené hodnoty z termoluminiscenčních dozimetrů za celou dobu experimentu v  $\mu\text{Sv}$

	TLD 1	TLD 2	TLD 3	TLD 4	TLD 5	TLD 6	TLD 7
Hp ( $\mu\text{Sv}$ )	18,94	48,85	30,26	40,04	57,04	75,18	60,06

Zdroj: Vlastní výzkum

Pozn. Tabulka 9-11: Rozmístění elektronických a termoluminiscenčních dozimetrů je podrobněji uvedeno v metodice společně s plánkem interakční haly s interakční komorou.

Tabulka 12: Naměřené hodnoty z elektronických dozimetrů pro osobní dávkový ekvivalent  $H_p(10)$  v jednotlivých dnech na 1 výstřel v  $\mu\text{Sv}$

	Výstřely	ED 1	ED2	ED 3	ED4	ED5	ED6	ED7	ED9	ED10	Thermo
04. 6.	4	x	0,5	0,25	0,5	0,5	x	x	0,75	0,75	1,25
05. 6.	9	x	0,33	0,22	0,22	0,44	x	x	0,44	0,55	0,67
06. 6.	10	0,2	0,3	0,5	0,3	0,4	0,2	0,2	0,6	0,6	0,6
09. 6.	9	0,11	0,33	0,56	0,22	0,44	0,22	0,33	0,33	0,44	0,56
10. 6.	11	0,18	0,18	0,56	0,33	0,36	0,27	0,36	0,45	0,45	0,45
11. 6.	9	0,11	0,33	0,78	0,22	0,56	0,22	0,22	0,56	0,67	0,67
12. 6.	11	0,18	0,27	0,56	0,18	0,45	0,18	0,27	0,64	0,36	0,73
13. 6.	8	0,25	0,25	0,5	0,38	0,63	0,25	0,25	0,5	0,38	0,75
<b>Suma</b>	<b>71</b>	<b>1,03</b>	<b>2,49</b>	<b>3,93</b>	<b>2,35</b>	<b>3,78</b>	<b>1,34</b>	<b>1,63</b>	<b>4,27</b>	<b>4,2</b>	<b>5,68</b>

Zdroj: Vlastní výzkum

Tabulka 13: Naměřené hodnoty z elektronických dozimetrů pro osobní dávkový ekvivalent  $H_s(0,07)$  v jednotlivých dnech na 1 výstřel v  $\mu\text{Sv}$

	Výstřely	ED 1	ED2	ED 3	ED 4	ED 5	ED 6	ED7	ED9	ED10	Thermo
04. 6.	4	x	0,75	1	0,75	0,75	x	x	1,25	1	1,5
05. 6.	9	x	0,44	0,67	0,22	0,56	x	x	0,78	0,44	1,11
06. 6.	10	0,3	0,3	0,8	0,4	0,5	0,3	0,4	0,7	0,6	0,8
09. 6.	9	0,22	0,56	1	0,33	0,44	0,56	0,44	1	0,56	1,22
10. 6.	11	0,27	0,36	0,73	0,27	0,56	0,45	0,36	0,73	0,56	0,82
11. 6.	9	0,33	0,44	1,33	0,56	0,56	0,33	0,33	1	1	1,22
12. 6.	11	0,18	0,36	12	0,36	0,56	0,36	0,45	0,81	0,64	1,09
13. 6.	8	0,25	0,5	1	0,25	0,75	0,25	0,38	1	1	1,13
<b>Suma</b>	<b>71</b>	<b>1,55</b>	<b>3,71</b>	<b>18,53</b>	<b>3,14</b>	<b>4,68</b>	<b>2,25</b>	<b>2,36</b>	<b>7,27</b>	<b>5,8</b>	<b>8,89</b>

Zdroj: Vlastní výzkum

Tabulka 14: Počet výstřelů v jednotlivých dnech a průměrná energie v kJ vztažená na 1 výstřel.

	Počet výstřelů/den	Průměrná energie kJ/výstřel
04. 6.	4	0,534
05. 6.	9	0,602
06. 6.	10	0,57
09. 6.	9	0,583
10. 6.	11	0,645
11. 6.	9	0,587
12. 6.	11	0,542
13. 6.	8	0,559
Minimum	4	0,534
Maximum	11	0,645

Zdroj: Vlastní výzkum

## 4. DISKUSE

V této kapitole diskutuji a hodnotím výsledky ze dvou měření, které byly prováděny na rozdílných experimentech v rozmezí asi půl roku od sebe. Na každé měření byl použit jiný typ osobních dozimetrů pro porovnání s elektronickými dozimetry. V prvním případě se použily filmové dozimetry a v druhém případě termoluminiscenční dozimetry. U každého měření bylo odlišné rozmístění dozimetrů. První měření se spíše snažilo zachytit fotony po celé místnosti interakční haly. U druhého měření jsem dozimetry rozmístila pouze po obvodu interakční komory a do ní. Bylo tak zejména učiněno po zjištění naměřených hodnot elektronickými dozimetry při prvním experimentu.

Dále v diskuzi pracuji s naměřenými hodnotami u elektronických osobních dozimetrů, které jsem si vztáhla na 1 výstřel. Každý den se počet výstřelů laserového systému Asterix IV liší. Zejména z důvodu přípravy laseru a elektronického zařízení používaných při experimentech. Příprava výstřelů je také závislá na nabíjení oscilátorů, které trvá 20-25 minut. Z tohoto důvodu je možné v jeden den (9-17 hod) vystřelit maximálně 16 výstřelů (1 výstřel za 30 minut). Každý výstřel má jinou energii, proto jsem si výsledky vztáhla také na 1kJ.

Během práce s lasery dodržují pracovníci daný režim, který je pro všechny experimentátory stejný. Především zahrnuje zákaz vstupu do experimentální haly v době výstřelu a to hlavně z důvodu radiační ochrany pracovníků. Do místnosti s interakčními komorami je doporučovaný vstup až po 5 minutách od výstřelu, pro otevření komory je čas ještě delší, přibližně 7-10 minut.

## 4.1 Experiment č. 1

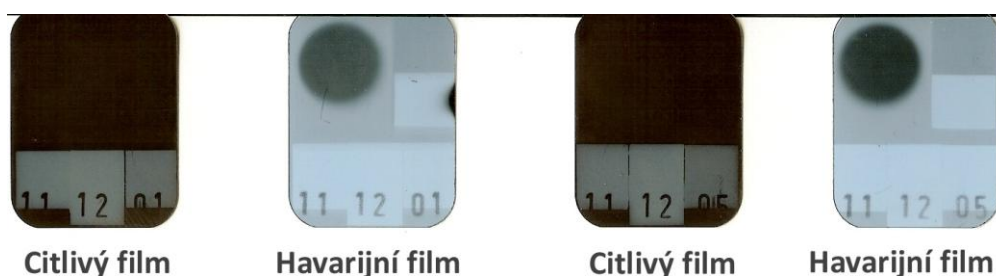
### 4.1.1 Porovnání hodnot naměřených elektronickými a filmovými dozimetry

Tabulka 3–5 v kapitole výsledky znázorňuje hodnoty osobního dávkového ekvivalentu  $H_p(10)$  a  $H_s(0,07)$  naměřené osobními elektronickými dozimetry pro jednotlivé dny experimentu a hodnoty osobního dávkového ekvivalentu  $H_p(10)$  naměřené osobními filmovými dozimetry za celé období experimentu. Z uvedených dat je patrné, že filmové dozimetry bohužel nevykazují až na dva dozimetry umístěné v komoře, žádná konkrétní data.

Z výsledků, které zpracoval CSOD vyplývá, že osobní dávkový ekvivalent  $H_p(10)$  u dvou dozimetrů překročil hodnotu  $10 \mu\text{Sv}$  pro rentgenové záření a  $100 \mu\text{Sv}$  pro gama záření. Stalo se tak u dozimetrů FD1, kde vyhodnocená hodnota byla  $3160 \mu\text{Sv}$  pro rentgenové záření a u dozimetrů FD5, kde vyhodnocená hodnota byla  $3780 \mu\text{Sv}$  pro rentgenové záření.

Ostatní filmové dozimetry (FD2,FD3,FD4,FD6,FD7,FD8,FD9,FD10) zaznamenaly hodnoty menší než  $10 \mu\text{Sv}$  pro rentgenové záření a  $100 \mu\text{Sv}$  pro gama záření.

Dozimetry FD1 a FD5 byly umístěny do experimentální komory. V místě lomu svazku byl dozimetr FD5, proto je hodnota vyšší než u dozimetrů FD1. Naskenované filmy FD1 a FD5, které zaslala služba CSOD jsou uvedeny na obrázku 20.



Obrázek 20: Naskenované ozářené filmy u FD1 a FD5. Zdroj: CSOD.s.r.o

Hodnoty naměřené na filmových dozimetrech, mimo dozimetr FD1 a FD5 umístěné uvnitř interakční komory, jsou shodné s hodnotami naměřenými osobním elektronickým dozimetrem. Tuto shodu dokazují zejména filmové osobní dozimetry umístěné s elektronickými dozimetry na stejném místě a mohou být tedy mezi sebou porovnány. Toto porovnání hodnot je uvedeno v tabulce 15.

Tabulka 15: Porovnání hodnot z filmových osobních dozimetrů a z elektronických osobních dozimetrů

ED	Naměřená dávka		FD	Naměřená dávka
	Hp	Hs		
1	51	102	7	<10
2	62	108		
3	116	157		
4	60	228	2	<10
6	46	127		
7	62	88	6	<10
8	59	98	8	<10
9	78	204	4	<10
10	51	80		
			1	3160
			5	3780
			10	<10
Thermo	84	133	9	<10

Zdroj: Vlastní výzkum

Elektronický osobní dozimetr ED1 byl umístěn na stejném místě jako filmový dozimetr FD7, tedy na nepoužívané interakční komoře, dále pak ED4 společně s FD2 umístěn na interakční komoře, která byla při experimentu používána. Oba dozimetry byly umístěny v místě dopadu paprsku. Elektronický dozimetr ED7 byl umístěn společně s filmovým dozimetrem FD6 na sloupu u dveří. ED8 společně s FD8 byly ve středu ramena nad interakční komorou.

Dozimetry ED9 a FD4 byly připevněny na racku (stojan pro elektrická zařízení), blízko interakční komory, asi 5 cm od dopadu laserového svazku na stěnu komory.

Vyšší hodnoty naměřené na filmových dozimetrech FD1 a FD5 bohužel nemohu porovnat s hodnotami z elektronických dozimetrů. Elektronické dozimetry nebyly do komory umístěny z důvodu vysokého magnetického impulsu, který se vyskytuje v oblasti laserového svazku, a tento impuls by mohl výrazně poškodit elektronické zařízení dozimetrů.

Výsledky dále ukazují, že hodnoty  $H_s(0,07)$  jsou ve všech případech vyšší (v některých případech až dvojnásobně) než hodnoty  $H_p(10)$ .

Nejnižší hodnota byla naměřena na dozimetru ED6, který byl umístěn v kumbálu, jenž se nachází v interakční hale a slouží jako sklad pro měřicí elektronické zařízení. Tento kumbál je odstíněn od okolní interakční haly z důvodu, aby se zamezilo poruše některých elektronických zařízení. Kumbál je sestaven z ocelové klece s Pb plechem.

Dozimetry ED1 umístěný na nepoužívané komoře a dozimetr ED10, umístěný na závěsném rameni nad komorami napravo, zaznamenaly stejnou celkovou hodnotu a to 51  $\mu\text{Sv}$ . Dozimetr ED2 umístěný na zdi a dozimetr ED7 umístěný na sloupě, zaznamenaly opět stejnou hodnotu, a to 62  $\mu\text{Sv}$ . V obou případech byly dozimetry se shodnými hodnotami umístěny v přibližně stejné vzdálenosti od interakční komory, proto je velikost naměřené dávky stejná.

Dozimetr ED5, který byl zavěšen na závěsném rameni vlevo, došla baterie, proto nezaznamenával žádné hodnoty a tudíž dozimetr ED5 není v tabulce vůbec zaznamenán.

Jelikož se vedle měřeného záření v místě měření téměř vždy vyskytuje také další záření, měřila jsem jedním dozimetrem (ED3) právě toto tzv. přirozené radioaktivní pozadí. Přirozené pozadí je součástí přírody. Tvoří ho kosmické záření, radioaktivní prostředí, nebo také záření z případných dalších okolních zdrojů. Proto množství záření není na všech místech stejné a záleží na mnoha faktorech: mimo jiné i na nadmořské



výšce. Na úroveň hodnot přírodního pozadí jsou všechny organismy, příroda i člověk dobře přizpůsobeny.

Nejvyšší naměřenou dávku zaznamenal u elektronických dozimetrů právě dozimetr ED3. Tento dozimetr byl umístěn v místnosti, kde pracují operátoři laserové akce, tzv. velín a sloužil pro měření pozadí. V této místnosti zaznamenal dozimetr celkovou hodnotu za 26 dní 114  $\mu\text{Sv}$ , což je až dvojnásobně vyšší hodnota než u ostatních dozimetrů umístěných v interakční hale. Předpokládám, že tuto vysokou hodnotu mohla zapříčinit pozice dozimetru, protože při měření mohl být dozimetr určený pro měření pozadí, uložený ve velíně, ozářen měkkým přirozeným zářením ze zdí, rozptýleného záření, z kosmu, apod. Na rozdíl od ostatních dozimetrů uložených v interakční hale, kde jsou lépe stíněny od přirozeného pozadí.

Přirozené pozadí jsem měřila z toho důvodu, abych získala relevantní informace o dávkách záření, které se v interakční hale obdrží nad jeho rámeček. Výsledky tohoto měření jsem zaznamenala do tabulky 16. Poté jsem provedla součet a vypočítala průměrné pozadí, včetně směrodatné odchylky.

Tabulka 16: Hodnota dávkového ekvivalentu  $H_p(10)$  a  $H_s(0,07)$  pro pozadí pro jednotlivé dny, jejich suma, průměrné pozadí a směrodatná odchylka (v  $\mu\text{Sv}$ ).

	$H_p(10)$	$H_s(0,07)$
24. října	4	4
25. října	4	6
26. října	4	6
27. října	5	7
28. října	4	6
29. října	5	5
30. října	4	6
31. října	5	3
1. listopadu	4	3
2. listopadu	5	6
3. listopadu	4	6
4. listopadu	4	6
5. listopadu	5	7
6. listopadu	5	6
7. listopadu	5	7
8. listopadu	5	6
9. listopadu	4	6
10. listopadu	5	6
11. listopadu	4	7
12. listopadu	4	8
13. listopadu	5	9
14. listopadu	4	9
15. listopadu	5	6
16. listopadu	3	6
17. listopadu	4	5
18. listopadu	4	5
Suma	114	157
Průměr	4,385	6,038
Směr. odchylka	0,571	1,428

Zdroj: Vlastní výzkum

Jak je vidět v tabulce 16 z výpočtu přirozeného pozadí vyplývá, že průměrné přirozené pozadí pro  $H_p(10)$  je tedy 4,358 pro  $H_s(0,07)$  je 6,038  $\mu\text{Sv}$ .

Výsledky zaznamenává elektronický dozimetr integrálně, tzn. jednou za den. Hodnota za jeden den znamená přírůstek osobního dávkového intervalu  $H_p$  a  $H_s$  za 24 hodin (U mého měření to znamená od 9:00 hod. – 9:00 hod.).

Velikost dávky záleží také na počtu výstřelů za celý den a také na množství energie u jednotlivých výstřelů. Hodnoty v  $\mu\text{Sv}$  vztažené na 1 výstřel jsou uvedeny v tabulce 6 a 7. V tabulce je uveden počet výstřelů a výsledné hodnoty na jeden výstřel. V tabulce jsem záměrně vynechala všechny víkendy, protože se o víkendu na PALSU nestřelí. Hodnoty naměřené a vztažené na jeden výstřel u  $H_p(10)$  se pohybují v rozmezí od 0,08  $\mu\text{Sv}$  do 1  $\mu\text{Sv}$  u  $H_s(0,07)$  se pohybují v rozmezí od 0,17 do 2  $\mu\text{Sv}$ . Celkové hodnoty  $H_s(0,07)$  jsou opět vyšší než hodnoty  $H_p(10)$

Počet výstřelů se pohybuje v rozmezí od 3 výstřelů do 14 výstřelů za den. Nejméně výstřelů bylo první den měření, největší počet výstřelů byl proveden 7. a 14. listopadu.

Podle plánu výstřelů jsem si sečetla energii výstřelů za celý den a vydělila počtem výstřelů, čímž jsem získala průměrnou energii v kJ na 1 výstřel. Toto číslo jsem poté zanesla do tabulky spolu s počtem výstřelů. Průměrná energie na 1 výstřel v jednotlivé dny se pohybuje v rozmezí od 0,509 kJ do 678 kJ. Počet výstřelů a průměrná energie, jejich maximum a minimum, jsou zaneseny v tabulce 8.

V tabulce 17 a 18 jsou naměřeny hodnoty z elektronických dozimetrů pro osobní dávkový ekvivalent  $H_p(10)$  a  $H_s(0,07)$  v jednotlivých dnech na 1 výstřel, jejich průměrná hodnota na 1 výstřel, rozptyl a směrodatná odchylka v  $\mu\text{Sv}$ . Nejvyšší průměrnou hodnotu na 1 výstřel zaznamenal dozimetr ED3 umístěný ve velíně a ED9, který byl umístěný na racku (stojan pro elektrická zařízení), který se nachází půl metru od místa dopadu paprsku. Proto je průměrná dávka  $H_p(10)$  vyšší než u ostatních dozimetrů.

Tabulka 17: Naměřené hodnoty z elektronických dozimetrů pro osobní dávkový ekvivalent  $H_p(10)$  v jednotlivých dnech na 1 výstřel, průměrná hodnota na 1 výstřel, rozptyl a směrodatná odchylka v  $\mu\text{Sv}$

	Výstřely	ED 1	ED 2	ED 3	ED4	ED6	ED7	ED8	ED9	ED10	Thermo
24. 10.	3	0,33	0,66	1,33	0,67	0,33	x	0,67	1	0,67	1,33
25. 10.	9	0,22	0,33	0,44	0,22	0,22	0,22	0,22	0,33	0,11	0,22
29. 10.	10	0,2	0,2	0,5	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,3
30. 10.	11	0,18	0,27	0,36	0,18	0,09	0,27	0,18	0,27	0,18	0,45
31. 10.	12	0,17	0,17	0,42	0,17	0,17	0,17	0,17	0,25	0,17	0,42
01. 11.	12	0,17	0,25	0,33	0,17	0,17	0,17	0,25	0,25	0,08	0,33
04. 11.	13	0,15	0,31	0,31	0,15	0,15	0,15	0,23	0,23	0,15	0,38
05. 11.	9	0,22	0,22	0,56	0,56	0,11	0,33	0,22	0,33	0,22	0,33
06. 11.	10	0,2	0,2	0,5	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,4
07. 11.	14	0,14	0,14	0,36	0,21	0,14	0,21	0,14	0,21	0,07	0,21
08. 11.	8	0,25	0,25	0,63	0,25	0,25	0,25	0,25	0,5	0,25	0,5
11. 11.	10	0,2	0,2	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,4
12. 11.	9	0,22	0,33	0,45	0,22	0,11	0,22	0,33	0,33	0,22	0,33
13. 11.	6	0,33	0,33	0,83	0,33	0,33	0,5	0,33	0,5	0,33	0,5
14. 11.	14	0,14	0,14	0,29	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,29
15. 11.	10	0,2	0,3	0,5	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1	0,2
18. 11.	5	0,4	0,4	0,8	0,6	0,4	0,6	0,4	0,6	0,2	0,44
Suma	165	3,72	4,70	9,01	4,67	3,41	4,13	4,63	6,14	3,69	7,03
Průměr	18,333	0,219	0,276	0,530	0,519	0,201	0,258	0,272	0,682	0,217	0,414
Rozptyl	9,096	0,005	0,015	0,066	0,028	0,007	0,016	0,016	0,040	0,021	0,064
Sm. odchyl.	3,016	0,072	0,123	0,258	0,167	0,085	0,126	0,125	0,201	0,144	0,254

Zdroj: Vlastní výzkum

Tabulka 18: Naměřené hodnoty z elektronických dozimetrů pro osobní dávkový ekvivalent  $H_s(0,07)$  v jednotlivých dnech na 1 výstřel, průměrná hodnota na 1 výstřel, rozptyl a směrodatná odchylka v  $\mu\text{Sv}$

	Výstřely	ED1	ED 2	ED 3	ED4	ED6	ED7	ED8	ED9	ED10	Thermo
24. 10.	3	0,67	1	1,33	2,33	1	1,33	1	2	1	2
25. 10.	9	0,45	0,45	0,67	0,89	0,33	0,45	0,45	0,67	0,22	0,78
29. 10.	10	0,4	0,5	0,5	1,2	0,4	0,5	0,3	0,9	0,2	0,5
30. 10.	11	0,45	0,36	0,55	0,82	0,64	0,45	0,27	1,09	0,18	0,56
31. 10.	12	0,33	0,33	0,25	0,75	0,42	0,33	0,33	0,83	0,25	0,5
01. 11.	12	0,25	0,42	0,25	0,75	0,58	0,25	0,25	0,75	0,17	0,58
04. 11.	13	0,38	0,46	0,46	0,31	0,38	0,23	0,23	0,62	0,31	0,54
05. 11.	9	0,67	0,33	0,78	1,22	0,67	0,22	0,33	0,89	0,45	0,67
06. 11.	10	0,4	0,5	0,6	1,1	0,7	0,4	0,5	1,1	0,2	0,8
07. 11.	14	0,29	0,29	0,5	0,57	0,43	0,21	0,29	0,64	0,29	0,57
08. 11.	8	0,63	0,38	0,75	1,13	1	0,38	0,5	0,75	0,63	0,88
11. 11.	10	0,6	0,3	0,7	1	0,5	0,2	0,3	0,5	0,3	0,8
12. 11.	9	0,44	0,67	0,89	1,33	0,78	0,22	0,67	1,33	0,44	0,78
13. 11.	6	0,66	1	1,5	2	1	0,67	0,67	1,5	0,33	0,83
14. 11.	14	0,21	0,36	0,64	0,71	0,21	0,21	0,36	0,64	0,21	0,29
15. 11.	10	0,6	0,6	0,6	0,8	0,3	0,5	0,3	1,1	0,3	0,3
18. 11.	5	1,2	1	1	2	0,8	0,6	0,6	1,2	0,8	0,8
Suma	165	8,63	8,95	11,97	18,91	10,14	7,15	7,35	16,51	6,28	12,18
Průměr	18,333	0,508	0,526	0,704	2,101	0,596	0,421	0,432	1,834	0,369	0,716
Rozptyl	9,096	0,054	0,061	0,110	0,296	0,065	0,077	0,042	0,147	0,055	0,141
Sm. odchyl.	3,016	0,233	0,248	0,332	0,544	0,255	0,277	0,205	0,383	0,234	0,376

Zdroj: Vlastní výzkum

## 4.2 Experiment č. 2

### 4.2.1 Porovnání hodnot naměřených elektronickými a termoluminiscenčními dozimetry

Tabulka 9-11 v kapitole výsledky znázorňuje hodnoty osobního dávkového ekvivalentu  $H_p(10)$  a  $H_s(0,07)$  naměřené osobními elektronickými dozimetry pro jednotlivé dny experimentu a hodnoty osobního dávkového ekvivalentu  $H_p(10)$  naměřeného termoluminiscenčními dozimetry za celé období experimentu.

Při druhém experimentu byly některé elektronické dozimetry umístěny i s termoluminiscenčními do komory. Proto je porovnávání hodnot objektivnější než u prvního měření. Elektronické dozimetry, které byly určeny pro uložení do komory, jsem obalila do aluminiové folie, aby se nezničily v silném magnetickém poli.

Celkové hodnoty naměřené na elektronických dozimetrech jsou přibližně srovnatelné s hodnotami na termoluminiscenčních dozimetrech. Porovnání je uvedeno v tabulce 19 a je uvedeno v  $\mu\text{Sv}$ . Například dozimetr ED2 zaznamenal celkovou hodnotu pouze o 3  $\mu\text{Sv}$  menší než dozimetr TLD3 umístěný na stejném místě. Dozimetr ED10 umístěný s dozimetrem TLD4 zaznamenal hodnotu přibližně stejnou. Lze tedy říct, že citlivost termoluminiscenčních dozimetrů je stejná jako u elektronických dozimetrů.

Elektronický dozimetr ED1, ED6 a ED7 musel být z důvodu nízké baterie umístěn do interakční haly o dva dny později než ostatní dozimetry. Z tohoto důvodu jsou celkové naměřené dávky nižší než u ostatních dozimetrů.

Nejvyšší hodnoty zaznamenaly dozimetry umístěné v komoře. V interakční komoře byly umístěny 3 kusy elektronických dozimetrů a 3 kusy termoluminiscenčních dozimetrů. Dozimetr ED3 společně s TLD5 byl umístěn na okně komory z vnitřní strany, ED9 s TLD7 uvnitř komory na levé straně a dozimetr Thermo s TLD6 byl umístěn vpravo v komoře.

Vysokou hodnotu zaznamenal také elektronický dozimetr ED5 s termoluminiscenčním dozimetrem TLD2 umístěných na boční straně komory zvenku v místě dopadu laserového paprsku a ED10 s termoluminiscenčním dozimetrem TLD4, umístěných v zadní části komory, kousek od místa průchodu paprsku do komory.

Tabulka 19: Porovnání hodnot z termoluminiscenčních osobních dozimetrů a z elektronických osobních dozimetrů (v  $\mu\text{Sv}$ )

ED	Hp	Hs	TLD	Hp
1	14	21		
2	26	37	3	30,26
3	41	74	5	57,04
4	23	31	1	18,94
5	38	47	2	48,85
6	18	29		
7	20	30		
9	43	69	7	60,06
10	41	55	4	40,04
Thermo	52	85	6	75,18

Zdroj: Vlastní výzkum

Obdobně jako u předešlého experimentu jsem vypočítala naměřené dávky na 1 výstřel. Hodnoty pro osobní dávkový ekvivalent  $H_p(10)$  vztažené na 1 výstřel jsou uvedeny v tabulce 12 a pro osobní dávkový ekvivalent  $H_s(0,07)$  jsou uvedeny v tabulce 13.

Počet výstřelů a průměrná energie za jednotlivé dny je uvedena v tabulce 14, taktéž jejich maximum a minimum. Průměrná energie na výstřel se pohybovala v rozmezí od 0,534 kJ do 0,645 kJ. Počet výstřelů se pohyboval od 4 výstřelů do 11 výstřelů. Nejvíce výstřelů bylo zaznamenáno 10. a 12. června, nejméně pak první den experimentu, pouze 4 výstřely.

V tabulce 20 a 21 jsou naměřené hodnoty z elektronických dozimetrů pro osobní dávkový ekvivalent  $H_p(10)$  a  $H_s(0,07)$  v jednotlivých dnech na 1 výstřel, průměrná

hodnota na 1 výstřel, rozptyl a směrodatná odchylka v  $\mu\text{Sv}$ . Průměrné hodnoty na 1 výstřel se pohybují od 0,172  $\mu\text{Sv}$  do 0,710  $\mu\text{Sv}$ . Největší průměrnou hodnotu na 1 výstřel zaznamenal elektronický dozimetr Thermo umístěný uvnitř komory. Nejnižší hodnotu zaznamenal dozimetr ED1 umístěný na boční straně komory směrem ke zdi interakční haly.



Tabulka 20 : Naměřené hodnoty z elektronických dozimetrů pro osobní dávkový ekvivalent  $H_p(10)$  v jednotlivých dnech na 1 výstřel, průměrná hodnota na 1 výstřel, rozptyl a směrodatná odchylka v  $\mu\text{Sv}$

	Výstřely	ED 1	ED2	ED 3	ED4	ED5	ED6	ED7	ED9	ED10	Thermo
04. června	4	x	0,5	0,25	0,5	0,5	x	x	0,75	0,75	1,25
05. června	9	x	0,33	0,22	0,22	0,44	x	x	0,44	0,55	0,67
06. června	10	0,2	0,3	0,5	0,3	0,4	0,2	0,2	0,6	0,6	0,6
09. června	9	0,11	0,33	0,56	0,22	0,44	0,22	0,33	0,33	0,44	0,56
10. června	11	0,18	0,18	0,56	0,33	0,36	0,27	0,36	0,45	0,45	0,45
11. června	9	0,11	0,33	0,78	0,22	0,56	0,22	0,22	0,56	0,67	0,67
12. června	11	0,18	0,27	0,56	0,18	0,45	0,18	0,27	0,64	0,36	0,73
13. června	8	0,25	0,25	0,5	0,38	0,63	0,25	0,25	0,5	0,38	0,75
Suma	71,00	1,03	2,49	3,93	2,35	3,78	1,34	1,63	4,27	4,20	5,68
Průměr	8,875	0,172	0,311	0,491	0,294	0,473	0,223	0,272	0,534	0,525	0,710
Rozptyl	4,982	0,003	0,008	0,033	0,012	0,008	0,001	0,004	0,017	0,020	0,057
S. odchylka	2,232	0,054	0,092	0,181	0,107	0,088	0,033	0,062	0,132	0,141	0,239

Zdroj: Vlastní výzkum

Tabulka 21: Naměřené hodnoty z elektronických dozimetrů pro osobní dávkový ekvivalent  $H_s(0,07)$  v jednotlivých dnech na 1 výstřel, průměrná hodnota na 1 výstřel, rozptyl a směrodatná odchylka v  $\mu\text{Sv}$

	Výstřely	ED 1	ED2	ED 3	ED4	ED5	ED6	ED7	ED9	ED10	Thermo
04. června	4	x	0,75	1	0,75	0,75	x	x	1,25	1	1,5
05. června	9	x	0,44	0,67	0,22	0,56	x	x	0,78	0,44	1.11
06. června	10	0,3	0,3	0,8	0,4	0,5	0,3	0,4	0,7	0,6	0,8
09. června	9	0,22	0,56	1	0,33	0,44	0,56	0,44	1	0,56	1,22
10. června	11	0,27	0,36	0,73	0,27	0,56	0,45	0,36	0,73	0,56	0,82
11. června	9	0,33	0,44	1,33	0,56	0,56	0,33	0,33	1	1	1,22
12. června	11	0,18	0,36	12	0,36	0,56	0,36	0,45	0,81	0,64	1,09
13. června	8	0,25	0,5	1	0,25	0,75	0,25	0,38	1	1	1,13
Suma	71,00	1,55	3,71	18,53	3,14	4,68	2,25	2,36	7,27	5,80	8,89
Průměr	8,875	0,258	0,464	2,316	0,393	0,585	0,375	0,393	0,909	0,725	1,047
Rozptyl	4,982	0,003	0,020	15,353	0,032	0,012	0,013	0,002	0,035	0,055	0,051
S.odchylka	2,232	0,054	0,142	3,918	0,180	0,110	0,113	0,046	0,186	0,235	0,226

Zdroj: Vlastní výzkum

## 5. ZÁVĚR

V diplomové práci jsem se zabývala měřením fotonů elektronickými osobními dozimetry při urychlování částic na Fyzikálním ústavu AV ČR v Praze. Urychlovač částic, na kterém bylo prováděno měření, byl experimentální laser ASTERIX IV (PALS).

Cílem mé práce bylo měřit elektronickými osobními dozimetry fotony, které vznikají při urychlování elektronů nebo protonů okolo primárního svazku a porovnat tyto hodnoty s hodnotami z jiných typů osobních dozimetrů, jako jsou filmové a termoluminiscenční.

V Badatelském centru PALS se neuvádí žádný typ osobních dozimetrů, není to potřeba, protože dávky naměřené v interakční hale nedosahují hodnot, které by vedly k radiologickému poškození pracovníků.

Dozimetry byly v interakční hale rozmístěny při dvou experimentech probíhajících přibližně půl roku od sebe. V obou případech bylo použito 10 kusů elektronických osobních dozimetrů DMC 2000 XB. Pro porovnání bylo při prvním experimentu použito 10 filmových dozimetrů a při druhém 7 sad po 4 kusech termoluminiscenčních dozimetrů. Vyhodnocení elektronických dozimetrů jsem prováděla v laboratoři Katedry laboratorních metod a informačních systémů na Zdravotně sociální fakultě Jihočeské univerzity. Filmové dozimetry byly zaslány do Celostátní služby osobní dozimetrie k vyhodnocení a termoluminiscenční dozimetry vyhodnocovala paní Ing. Olšovcová, PhD., z Fyzikálního ústavu AV ČR v Praze.

V únoru tohoto roku mělo proběhnout ještě jedno měření na Fyzikálním ústavu AV ČR v Praze na experimentálním laserovém systému Ti-Sapphire. Z důvodu poruchy na tomto přístroji se měření neuskutečnilo a laser byl poslán do USA k opravě. Přístroj měl být funkční již v letních měsících. Přes veškeré snahy se přístroj opět porouchal a nebylo možné na přístroji provést měření.

Na základě dvou měření jsem došla k závěrům, že osobní elektronický dozimetr je vhodný pro práci s experimentálními lasery. Elektronický dozimetr je citlivější než

filmový dozimetr. Dávka je zobrazena ihned na displeji a vyhodnocení je rychlé pomocí čtečky a počítače. Nevýhodou tohoto dozimetru je nízká kapacita baterie a také vysoká cena baterie. Další nevýhodou těchto dozimetrů je, že se nemohou používat v magnetickém poli kvůli poškození elektrické mechaniky uvnitř přístroje. Porovnání s termoluminiscenčními dozimetry dopadlo podobně ohledně citlivosti. Hodnoty naměřené termoluminiscenčními dozimetry jsou velmi podobné jako hodnoty naměřené elektronickými dozimetry. Výhodou termoluminiscenčních dozimetrů jsou nižší pořizovací náklady, nevýhodou je absence displeje, složité a zdlouhavé vyhodnocení dávky.

Hypotézy práce zní: dávky jsou měřitelné osobními elektronickými dozimetry a výsledky měření pomocí elektronických dozimetrů jsou porovnatelné s měřením pomocí filmů. První hypotéza diplomové práce byla potvrzena měřením na obou experimentech. Dávky jsou opravdu měřitelné elektronickými osobními dozimetry jak typu DMC 2000 XB tak typem Thermo Scientific EPD MK2. Druhá hypotéza byla částečně potvrzena při měření na prvním experimentu. Dávky jsou porovnatelné s dávkami z filmových dozimetrů, ale CSOD vyhodnotí dávky pouze nad 10  $\mu\text{Sv}$ . Neschopnost srovnat naměřené výsledky tedy nespočívá ve vyhodnocování, ale v citlivosti filmového dozimetru.

Výsledky diplomové práce jednoznačně podporují možnost využití elektronických osobních dozimetrů při práci s experimentálními lasery a doporučují použití typu DMC 2000 XB v novém Centru ELI v Praze.

## 6. SEZNAM INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

- [1] OLŠOVCOVÁ V., KRŮS M., ZELENKA Z., VELYHAN A., KOZLOVÁ A, RUS B., *Radiation protection aspects in the vicinity of TW class laser systems, Progress in Nuclear Science and Technology*, In press: Progress in Nuclear Science and Technology, Volume 4 (2014) pp. 173-177
- [2] FYZIKÁLNÍ ÚSTAV AV ČR: Prague asterix laser system. [online]. [citováno 20. 6. 2014]. <<http://www.pals.cas.cz/cz/>>
- [3] BREDERLOW G., WITTE K.-J., FILL E., HOHLA K., VOLK R.: *The ASTERIX III Pulsed High-Power Iodine Laser*, IEEE J. Quantum Electron., Vol.12,152-155, 1976
- [4] BAUMHACKER H, BREDERLOW G., CHEN CH., FILL E., KRAUSE H., VOLK R., WITTE K.J.: *The Asterix IV Iodine Laser*, Kohler, H. (Ed. ), *Laser: Technologie und Anwendungen*. Jahrbuch, Essen: Vulkan 1988, 1. Ausgabe, p.46-48
- [5] BAUMHACKER, H., BREDERLOW, G., FILL, E., SCHILLINGER, H., SCHROEDTER, C., VOLK, R., WITKOWSKI, S., WITTE, K.J. *Status Report of the ASTERIX IV High Power Iodine Laser*, 3. International Workshop on Iodine Lasers and Applications, Bechyne Castle (CZ), 28.09.92 – 02.10.92, SPIE Vol. 1980 Iodine Lasers and Applications (1992)
- [6] CHVOJKA M., HERMOCH V., KRALIKOVA B., KRASA J., LASKA L., MASEK K., MUSIL J., POLAK S., ROHLENA K., SCHMIEDBERGER J., SULEK J.: *100GW Pulsed Iodine Photodissociation Laser System PERUN I*, Czech Jour. Phys. B48, 1337-1356, 1988

[7] BAUMHACKER H., BREDERLOW G., FILL E., VOLK R., WITKOWSKI S., WITTE K.J.: *Layout and Performance of the Asterix IV Iodine Laser at MPQ*, Garching, Appl. Phys. B, Vol. 61, 325-332,1995

[8] WITKOWSKI, S.: *Laser und thermonukleare Fusion*, Naturwissenschaften, Vol.57, 211-216, 1970

[9] AUGUSTA a spol. *Velká kniha o energii*. Praha: L.A. Consulting Agency spol. s.r.o., 2001. 383 s. ISBN 80-238-6578-1.

[10] AUTORSKÝ KOLEKTIV. *Radiobiologie. Záření alfa.. Kapitola 1.4.1* [online], Sirdik, [citováno 20. 06. 2014] <<http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/14/141.html>>

[11] AUTORSKÝ KOLEKTIV. *Radiobiologie. Záření beta.. Kapitola 1.4.2* [online], Sirdik, [citováno 20. 06. 2014] <<http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/14/142.html>>

[12] AUTORSKÝ KOLEKTIV. *Radiobiologie. Záření gama Kapitola 1.4.3* [online], Sirdik, [citováno 20. 06. 2014] <<http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/14/143.html>>

[13] AUTORSKÝ KOLEKTIV. *Radiobiologie. Rentgenové záření Kapitola 1.4.5* [online], Sirdik, [citováno 20. 06. 2014] <<http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/14/145.html>>

[14] AUTORSKÝ KOLEKTIV. *Radiobiologie. Neutronové záření Kapitola 1.4.4* [online], Sirdik, [citováno 20. 06. 2014] <<http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/14/144.html>>

[15] STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST. *Stručný přehled biologických účinků záření*. [online], SÚJB, [citováno 20. 06. 2014] <<http://www.sujb.cz/radiacni-ochrana/oznameni-a-informace/strucny-prehledbiologickyh-ucinku-zareni/>>

- [16] AUTORSKÝ KOLEKTIV. *Radiobiologie. Deterministické účinky*. Kapitola 7.5.2 [online], Sirdik, [citováno 20. 06. 2014] <<http://fbmi.sirdik.org/7-kapitola/75/752.html>>
- [17] SABOL, J. *Základy dozimetrie*. Praha: ČVUT, 1992. 148 s. ISBN 80-01-00847-9.
- [18] ČESKO. Zákon č. 18 ze dne 24. ledna 1997 o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých předpisů. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 1997
- [19] HÁLA, J. *Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie*. Brno: Konvoj, 1998. 311 s. ISBN 80-85615-56-8.6.
- [20] ULLMANN, Vojtěch. *Jaderná a radiační fyzika*. [online], Astro Nukl Fyzika: jaderná fyzika – astrofyzika – kosmologie – filosofie, [citováno 20. 06. 2014] <<http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika6.htm>>
- [21] ULLMANN, Vojtěch. *Jaderná a radiační fyzika – Urychlovače*. [online], Astro Nukl Fyzika: jaderná fyzika – astrofyzika – kosmologie – filosofie, [citováno 20. 06. 2014] <<http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika5.htm#Urychlovace> >
- [22] SINGER, J. *Dozimetrie ionizujícího záření*. 1. vydání. České Budějovice: Jihočeská univerzita, Zdravotně sociální fakulta, 2005. 67 s. ISBN:80-7040-752-2
- [23] SINGER J., "Radiační kultura a její kurikulární proces", monografie "Education Didactic Communication" 2. díl, Editor Singer J., (103 str.), Didaktis, Bratislava, 2014, ISBN 978-80-89160-97-6
- [24] ČESKO. Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 307 ze dne 13. června 2002 o radiační ochraně ve znění vyhlášky č. 499 ze dne 6. prosince 2005, a vyhlášky č. 389 ze dne 16. listopadu 2012 - § 77. In: *Sbírka zákonů České*

republiky. 2002.

[25] ČESKO. Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 307 ze dne 13. června 2002 o radiační ochraně ve znění vyhlášky č. 499 ze dne 6. prosince 2005, a vyhlášky č. 389 ze dne 16. listopadu 2012 - § 2. In: Sbíрка zákonů České republiky. 2002.

[26] KUNA, P., NAVRÁTIL, L. et al. *Klinická radiobiologie*. Manus, 2005. 222 s. ISBN 80-86571-09-2

[27] GERNDT, J. Detektory ionizujícího záření. Praha : ČVUT, 1994.. ISBN 80-01-01229-8.

[28] KLENER, V. et al. *Principy a praxe radiační ochrany*. Praha : Azin, 2000. ISBN 80-238-3703-6.

[29] ROZLÍVKA, Zdeněk. *Radiační ochrana na pracovištích s diagnostickými rentgeny ve zdravotnictví*. Pardubice, 2006. učební texty kurzu.

[30] AUTORSKÝ KOLEKTIV. *Radiobiologie. Filmová dozimetrie* Kapitola 1.6.3 [online], Sirdik, [citováno 20. 06. 2014] <<http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/16/163.html>>

[31] AUTORSKÝ KOLEKTIV. *Radiobiologie. Elektronická dozimetrie* Kapitola 1.6.6 [online], Sirdik, [citováno 20. 06. 2014] <<http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/16/166.html>>

[32] AUTORSKÝ KOLEKTIV. *Radiobiologie. Termoluminiscenční dozimetrie* Kapitola 1.6.4 [online], Sirdik, [citováno 20. 06. 2014] <<http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/16/164.html>>

[33] ČESKO. Zákon č. 18 ze dne 24. ledna 1997 o mírovém využívání jaderné energie a



ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých předpisů - § 2. In: Sbírnka zákonů České republiky. 1997

[34] JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH. *Základy radiační ochrany*. Doplnkové texty pro posluchače kombinované formy studia studijního programu „Ochrana obyvatelstva“ studijního oboru „Civilní nouzová připravenost“. České Budějovice: Jihočeská univerzita, Zdravotně sociální fakulta, 2007. 33 s.

[35] SINGER, Jan, HEŘMANSKÁ, Jindřiška, *Principy radiační ochrany*. 1. vydání. České Budějovice: Jihočeská univerzita, Zdravotně sociální fakulta, 2004. 110 s. ISBN:80-7040-708-5

[36] AUTORSKÝ KOLEKTIV. *Radiobiologie. Veličiny používané v radiační ochraně*. Kapitola 1.5.5 [online], Sirdik, [citováno 20. 06. 2014] <<http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/15/155.html>>

[37] PISARCZYK T. *Femtosecond interferometric investigation of initial stages of the shock ignition relevant plasmas generated by laser irradiation of planar targets*. Prague asterix laser system. 2013. [online], PALS [citováno 22. 07. 2014] <<http://www.pals.cas.cz/cz/femtosecond-polaro-interferometric-investigation-of-initial-stages/>>

[38] KRÁSA J. *Účinná produkce fúzních neutronů v Z-pinčích a v laserem produkovaném plazmatu*. Prague asterix laser systém. 2014, [online], Informační systém výzkumu experimentálního vývoje a inovací. [citováno 22. 07. 2014] <<http://www.isvav.cz/projectDetail.do?rowId=GAP205/12/0454>>

[39] AUTORSKÝ KOLEKTIV. *Radiobiologie. Filmová dozimetrie*. Kapitola 1.6.3 [online], Sirdik, [citováno 20. 06. 2014] <<http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/16/163.html>>

- [40] ] AUTORSKÝ KOLEKTIV. *Radiobiologie. Termoluminiscenční dozimetrie* Kapitola 1.6.4 [online], Sirdik, [citováno 20. 06. 2014] <<http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/16/164.html>>
- [41] CELOSTÁTNÍ SLUŽBA OSOBNÍ DOZIMETRIE, s.r.o. Typy dozimetrů. [online], CSOD, s.r.o., [citováno 20. 06. 2014] <<http://www.csod.cz/dozimetry/>>
- [42] MGP INSTRUMENTS SA. *Elektronicky osobní dozimetr DMC 2000 X/S/XB*. Uživatelská příručka. France: Lamanon, 2006
- [43] THERMO SCIENTIFIC FISHER, 2009, England [online] United Kingdom, [citováno 22. 07. 2014] <[http://www.sematronik.com/ebaypdf/manuel\\_mk2.pdf](http://www.sematronik.com/ebaypdf/manuel_mk2.pdf)>
- [44] MGP INSTRUMENTS SA. *Čtečka LDM 220*. Uživatelský manual. France. Lamanon, 2008
- [45] ZÁŠKODNÝ, Přemysl, R. HAVRÁNKOVÁ, J. HAVRÁNEK VURM M. *Základy statistiky (s aplikací na zdravotnictví)*. Praha: Curriculum, 2011. 256 pp. ISBN 978-80-904948-2-4
- [46] BORNE , DELACROIX, GELÉ,, MASSÉ, AMIRANOFF, *Radiation protection for an ultra-high intensity laser*, Radiation Protection Dosimetry 102 (1) (2002), pp. 61-70
- [47] SCHNURER, NOLTE, ROUSSE, GRILLON, CHERIAUX, KALACHNIKOV, NICKLES, SANDNER, *Dosimetric measurements of electron and photon yields from solid targets irradiated with 30 fs pulses from a 14 TW laser*, Physical Review E, Vol. 61 (4) 2000.

[48] SINGER J., ŠMOLDASOVÁ J., PETROVÁ I., Dosimetric dependences of DMC 2000XB. *Bezpečnost jaderné energie*, V. 19(57), 2011, No. 5/6, p. 153-157, ISSN 1210-7085

[49] ICRP 1934 INTERNATIONAL RECOMMENDATIONS. *1934 International Recommendations for X-Ray and Radium Protection*. Revised by the International X Ray and Radium Protection Commission at the Fourth International Congress of Radiology, Zürich, July 1934

[50] ICRP PUBLICATION 103. *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Annals of the ICRP. Editor: J. Valentin. Published by Elsevier, 2007

[51] KONEČNÝ, Jiří. *Radiační ochrana I. Doplňkové texty pro posluchače kombinované formy studia studijního oboru „Ochrana obyvatelstva“*. České Budějovice: Jihočeská univerzita, Zdravotně sociální fakulta, 2007. 19 s.

[52] HAVRÁKOVÁ, R., HAVRÁNEK, J., KARDA, L., NAVRÁTIL, L. a BREHOVSKÁ L. *Elektronická osobní dozimetrie jako prostředek ochrany osob při zásahu složek integrovaného záchranného systému*. [online], The Science for Population Protection, 2012, roč. 4, č. 3. [citováno 22. 07. 2014]  
<[http://www.populationprotection.eu/attachments/043\\_vol4n3\\_havrankova\\_havranek\\_karda\\_navratil\\_brehovska.pdf](http://www.populationprotection.eu/attachments/043_vol4n3_havrankova_havranek_karda_navratil_brehovska.pdf)>

[53] ANNALS OF THE ICRP. ICRP publication 96, *Protecting people against radiation exposure in the event of a radiological attack* Stockholm: 2005. 110 S. ISBN 008-0446256.

## 7. SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: *Rozmístění dozimetrů*

Tabulka 2: *Rozmístění dozimetrů*

Tabulka 3: *Naměřené hodnoty z elektronických dozimetrů pro osobní dávkový ekvivalent  $H_p(10)$  v jednotlivých dnech v  $\mu\text{Sv}$*

Tabulka 4: *Naměřené hodnoty z elektronických dozimetrů pro osobní dávkový ekvivalent  $H_s(0,07)$  v jednotlivých dnech v  $\mu\text{Sv}$*

Tabulka 5: *Naměřené hodnoty z filmových dozimetrů za celou dobu experimentu v  $\mu\text{Sv}$*

Tabulka 6: *Naměřené hodnoty z elektronických dozimetrů pro osobní dávkový ekvivalent  $H_p(10)$  v jednotlivých dnech na 1 výstřel v  $\mu\text{Sv}$*

Tabulka 7: *Naměřené hodnoty z elektronických dozimetrů pro osobní dávkový ekvivalent  $H_s(0,07)$  v jednotlivých dnech na 1 výstřel v  $\mu\text{Sv}$*

Tabulka 8: *Počet výstřelů v jednotlivých dnech a průměrná energie v kJ vztahovaná na 1 výstřel.*

Tabulka 9: *Naměřené hodnoty z elektronických dozimetrů pro osobní dávkový ekvivalent  $H_p(10)$  v jednotlivých dnech v  $\mu\text{Sv}$*

Tabulka 10: *Naměřené hodnoty z elektronických dozimetrů pro osobní dávkový ekvivalent  $H_s(0,07)$  v jednotlivých dnech v  $\mu\text{Sv}$*

Tabulka 11: *Naměřené hodnoty z termoluminiscenčních dozimetrů za celou dobu experimentu v  $\mu\text{Sv}$*

Tabulka 12: *Naměřené hodnoty z elektronických dozimetrů pro osobní dávkový ekvivalent  $H_p(10)$  v jednotlivých dnech na 1 výstřel v  $\mu\text{Sv}$*

Tabulka 13: *Naměřené hodnoty z elektronických dozimetrů pro osobní dávkový ekvivalent  $H_s(0,07)$  v jednotlivých dnech na 1 výstřel v  $\mu\text{Sv}$*

Tabulka 14: *Počet výstřelů v jednotlivých dnech a průměrná energie v kJ vztahovaná na 1 výstřel.*

Tabulka 15: *Porovnání hodnot z filmových osobních dozimetrů a z elektronických osobních dozimetrů*

Tabulka 16: *Hodnota dávkového ekvivalentu  $H_p(10)$  a  $H_s(0,07)$  pro pozadí pro jednotlivé dny, jejich suma, průměrné pozadí a směrodatná odchylka (v  $\mu\text{Sv}$ ).*

Tabulka 17: *Naměřené hodnoty z elektronických dozimetrů pro osobní dávkový ekvivalent  $H_p(10)$  v jednotlivých dnech na 1 výstřel, průměrná hodnota na 1 výstřel, rozptyl a směrodatná odchylka v  $\mu\text{Sv}$*

Tabulka 18 : *Naměřené hodnoty z elektronických dozimetrů pro osobní dávkový ekvivalent  $H_s(0,07)$  v jednotlivých dnech na 1 výstřel, průměrná hodnota na 1 výstřel, rozptyl a směrodatná odchylka v  $\mu\text{Sv}$*

Tabulka 19: *Porovnání hodnot z termoluminiscenčních osobních dozimetrů a z elektronických osobních dozimetrů (v  $\mu\text{Sv}$ )*

Tabulka 20: *Naměřené hodnoty z elektronických dozimetrů pro osobní dávkový ekvivalent  $H_p(10)$  v jednotlivých dnech na 1 výstřel, průměrná hodnota na 1 výstřel, rozptyl a směrodatná odchylka v  $\mu\text{Sv}$*

Tabulka 21: *Naměřené hodnoty z elektronických dozimetrů pro osobní dávkový ekvivalent  $H_s(0,07)$  v jednotlivých dnech na 1 výstřel, průměrná hodnota na 1 výstřel, rozptyl a směrodatná odchylka v  $\mu\text{Sv}$*

## 8. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: *Laserová akce*

Obrázek 2: *Přechod mezi hladinami.*

Obrázek 3: *Spektrální komponenta*

Obrázek 4: *Reakční kanály*

Obrázek 5: *Filmový dozimetr*

Obrázek 6: *Elektronický dozimetr*

Obrázek 7: *Celková uspořádání*

Obrázek 8: *Uspořádání oscilátorové sekce se zesilovači*

Obrázek 9: *Interakční hala*

Obrázek 10: *Interakční komory*

Obrázek 11: *Plánek rozmístění dozimetrů při prvním experimentu*

Obrázek 12: *Umístění dozimetrů na interakční komoře (komora 1 nahoře ED4, FD2)*

Obrázek 13: *Umístění dozimetrů na interakční komoře*

Obrázek 14: *Termoluminiscenční dozimetry*

Obrázek 15: *Umístění dozimetrů na interakční komoře*

Obrázek 16: *Umístění dozimetrů (Zadní část komory vpravo: ED 10, TLD 4).*

Obrázek 17: *Čtečka LDM 220 a Elektronický osobní dozimetr DMC 2000 XB*

Obrázek 18: *DosiFast*

Obrázek 19: *DosiFast*

Obrázek 20: *Naskenované ozářené filmy u FD1 a FD5*

## 9. PŘÍLOHY

Seznam příloh:

Příloha 1: *Plánek celého laserového systému PALS*

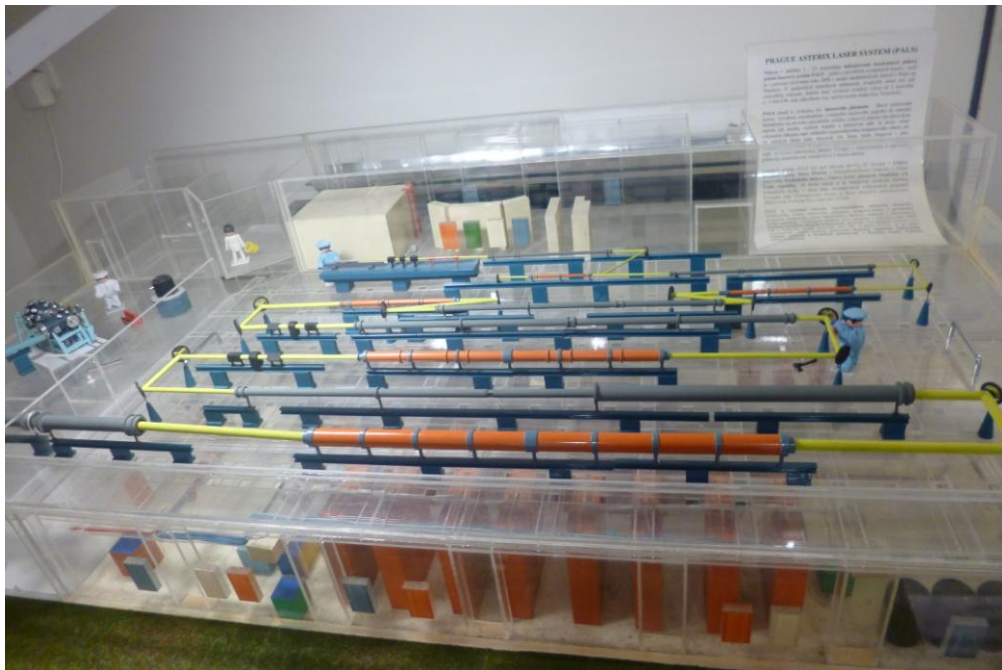
Příloha 2: *Interakční komora a předepsaný typ oblečení do interakční haly*

Příloha 3: *Upevňování dozimetřů na závěsné rameno*

Příloha 4: *Fotografie umístěných dozimetřů v interakční hale*

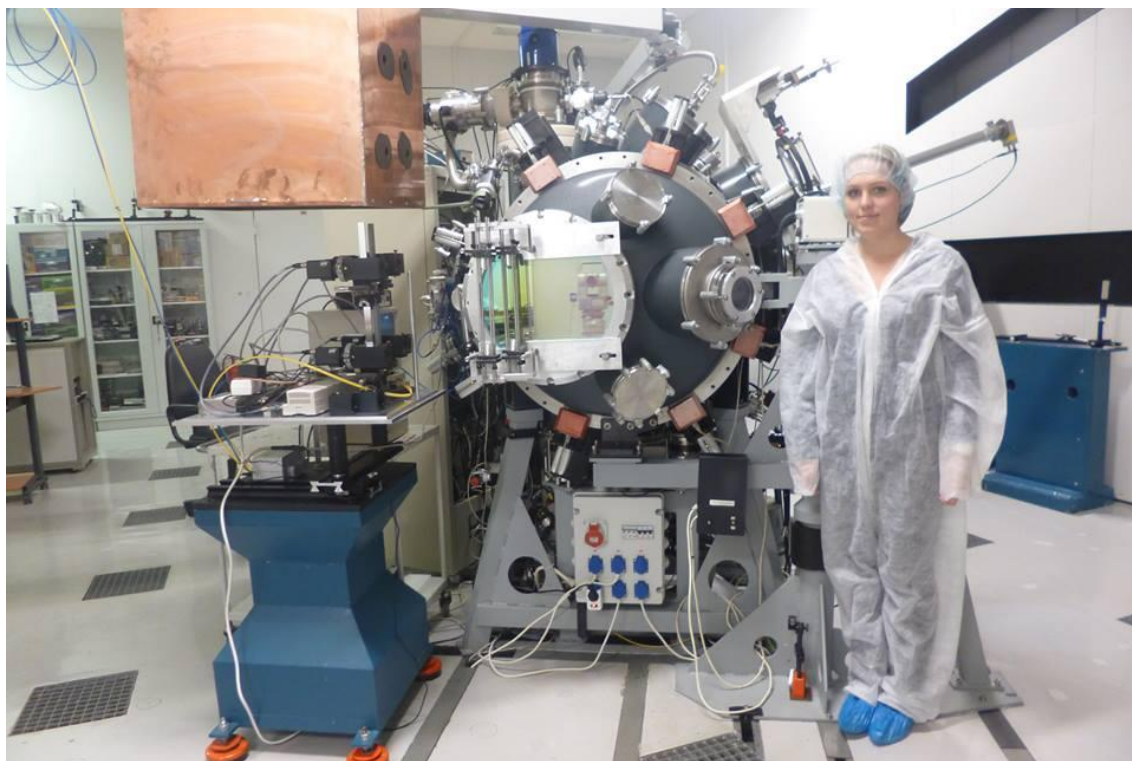
Příloha 5: *Fotografie umístěných dozimetřů uvnitř komory*

Příloha 1: Plánek celého laserového systému PALS



Zdroj: Vlastní výzkum

## Příloha 2: Interakční komora a předepsaný typ oblečení do interakční haly

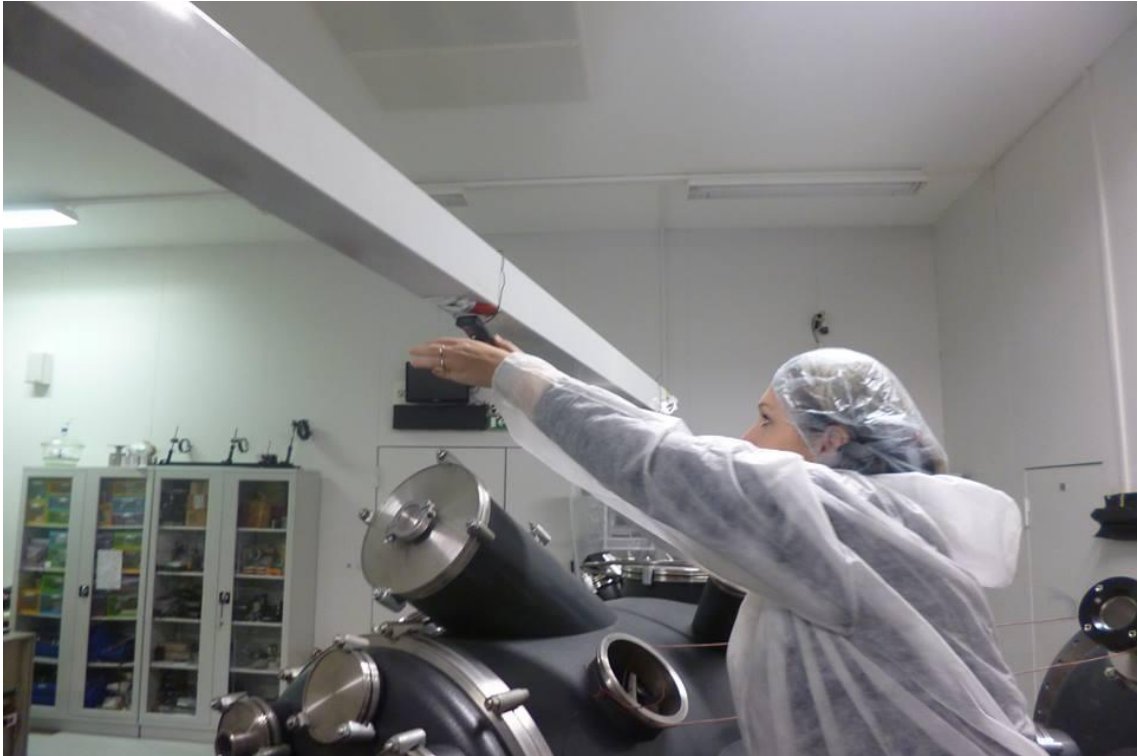


Zdroj: Vlastní výzkum

Pozn.: V interakční místnosti je předepsaný tento typ oblečení z důvodu zamezení výskytu prachových částic, které ovlivňují vychýlení paprsku ze své osy.



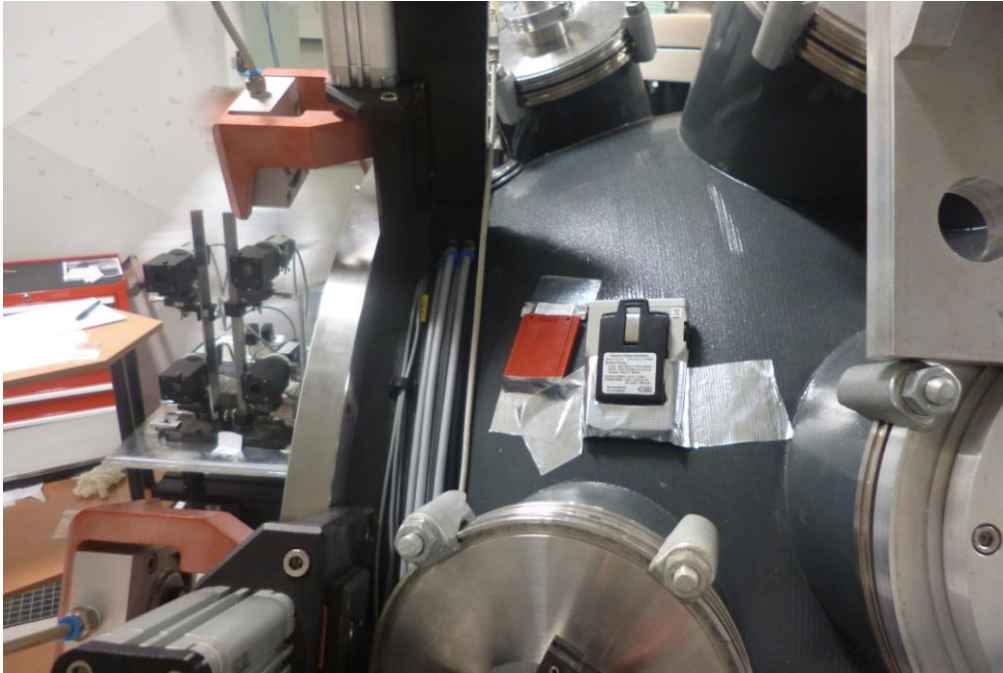
### Příloha 3: Upevňování dozimetrů na závěsné rameno



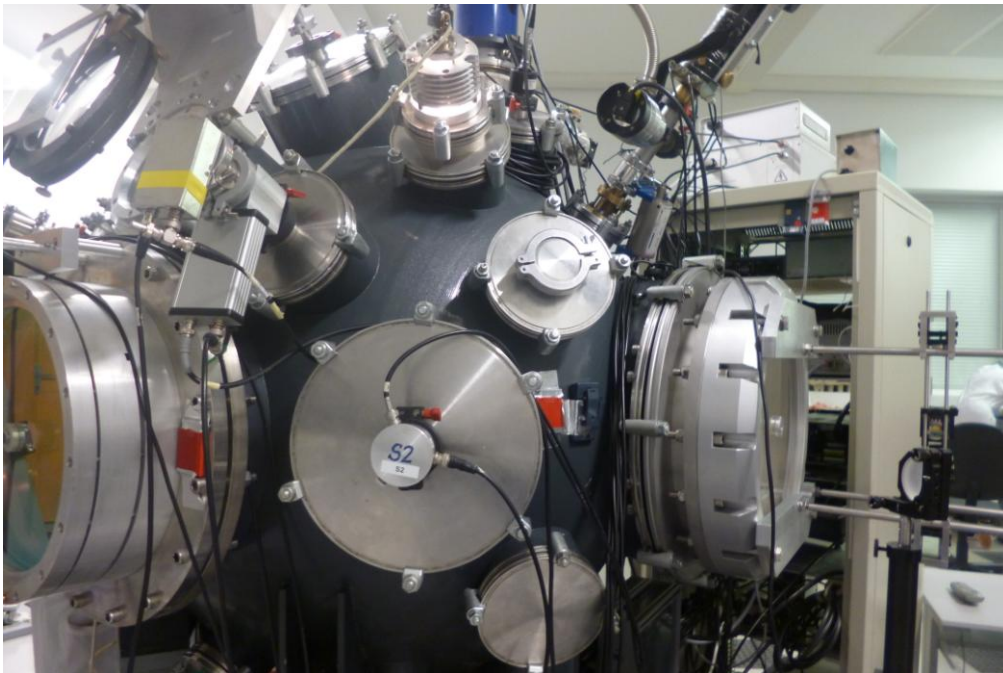
Zdroj: Vlastní výzkum

Pozn. : Dozimetry byly umístěovány pomocí drátků nebo izolační pásky

Příloha 4: Fotografie umístěných dozimetřů v interakční hale



Zdroj: Vlastní výzkum



Zdroj: Vlastní výzkum

Příloha 5: Fotografie umístěných dozimetrů uvnitř komory



Zdroj: Vlastní výzkum



