



**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

F3

**Fakulta elektrotechnická
Katedra měření**

Diplomová práce

Integrace měřicího řetězce s detektorem Timepix pro termovakuovou komoru

Bc. Matyáš Škvor
Letectví a kosmonautika

Leden 2022

Vedoucí práce: Ing. Ladislav Sieger, CSc.

Poděkování / Prohlášení

Děkuji Ing. Ladislavu Siegerovi, CSc. za příležitost podívat se na fascinující místa, daleko za hranicemi všedních dní; ve fyzickém i přeneseném významu. Děkuji mu za pečlivost a vytrvalost v závěrečné fázi práce. Dále děkuji skupině nadšenců, vědců, inženýrů a trochu bláznů rentgenové optiky za důvěru a přijetí. Bylo mi hlubokou ctí a radostí trávit s Vámi desítky hodin v laboratořích. V neposlední řadě děkuji za trpělivost a pochopení všem, na jejichž úkor jsem je tam trávil.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 4. 1. 2022

.....

Abstrakt / Abstract

Práce se zabývá automatizací měření parametrů rentgenových optik pro kosmické účely. Automatizace byla prováděna na demonstrátoru rentgenového cubesatu a rentgenové optice s ohniskem 6,5 m. V rámci diplomové práce byl vyvinut modulární systém obsahující posuvné stolky, řadu rentgenových senzorů a měřicí software. Byla ověřena jeho funkčnost a provedena řada měření, čímž byl naplněn primární cíl práce. Měření rentgenových optik bylo provedeno ve třech fázích: V optické laboratoři FS ČVUT, v termovakuovém tunelu ve VZLU Praha a v Ústavu Maxe Plancka v Mnichově na zařízení Panter. Výsledek této práce přispívá k vědeckému poznání v oblasti astrofyziky.

Klíčová slova: Račí oko, Kirkpatrick-Baez, Rentgenová optika, Ketek, SXD, Max-Planck Institut, MPE Panter, Python, Qt, Hamamatsu, Timepix, Automatizovaný měřicí systém

The thesis focuses on the automation of X-ray optics parameter measurements for space applications. The automation was realized on an X-ray cubesat demonstrator and X-ray optics with a focal length of 6.5 m. A modular system containing moving stages, a number of X-ray sensors and measurement software was developed as part of the thesis. Its functionality was verified and a series of measurements were made, thus fulfilling the primary objective of the thesis. The measurements of X-ray optics were performed in three phases: in the optical laboratory of the CTU, in the thermal vacuum tunnel at the VZLU Prague and at the Max Planck Institute in Munich on the Panter facility. The result of this work contributes to scientific knowledge in the field of astrophysics.

Keywords: Kirkpatrick-Baez, X-Ray optics, Lobster Eye, Ketek, SXD, Max-Planck Institut, MPE Panter, Python, Qt, Hamamatsu, Timepix, Automated Measurement System

Title translation: Integration of the measuring chain with the Timepix detector for the thermovacuum chamber

Obsah /

1 Úvod	3
1.1 Rentgenové záření	4
1.1.1 Rentgenky	5
1.2 Optiky pro rentgenovou ast- ronomii	7
1.2.1 Wolterova optika	7
1.2.2 Kirkpatrick–Baez	8
1.2.3 Optika typu Račí oko	9
1.2.4 Multifóliová optika	11
1.3 Úroveň technologické přípra- venosti	11
2 Technické požadavky na vývoj kosmických aplikací	12
2.1 Rentgenové tunely	12
Vakuové pumpy	12
Plynění materiálů	12
2.2 Čisté prostory	13
3 Pracoviště pro testování optiky ..	14
3.1 Laboratoř optiky FS ČVUT ..	14
3.2 Laboratoř satelitů VZLU	15
3.2.1 Čisté prostory	15
3.2.2 Termovakuová komora ...	15
3.2.3 Rentgenový zářič	16
3.3 MPE Panter	17
3.3.1 Zdroje záření	18
3.3.2 Detektory	18
3.3.3 Instalace zařízení	19
4 Měřicí řetězec	20
4.1 Timepix	20
4.1.1 Timepix QUAD detek- tor	21
4.1.2 Pixet	21
4.2 Rentgenový spektrometr Ke- tek	22
4.3 Rentgenový spektrometr SXD	24
4.4 Řádková kamera Hamamatsu .	25
4.5 Posuvné stolky	26
4.6 PICO - KBU4	27
5 Ovládací software xdMeasure ...	28
5.1 Jádru xdMeasure	28
5.2 Posuvné stolky	29
5.3 CCD a pixelové detektory	31
5.4 Řádková kamera Hamamatsu .	31
5.5 Timepix a QUAD	32
5.6 Spektrometry	34
5.6.1 Ketek	35
5.6.2 SXD	35
5.7 Uživatelské rozhraní	36
5.7.1 Ovládání	36
5.7.2 Nástroje	38
Univerzální 1D skener ...	38
Hamamatsu skener	38
6 Testované experimentální za- řízení	40
6.1 Demonstrátor rentgenového dalekohledu	40
6.2 KB-6500	40
6.3 Sjednocený demonstrátor pro Panter	40
6.3.1 Vypékání	41
7 Měření	42
7.1 KB-6500	42
7.1.1 Měření ohniska ve vi- ditelném spektru	42
Výsledky měření	46
7.1.2 Měření v rentgenovém spektru	46
7.2 SR-CTP	48
7.2.1 Automatické změření v náklonech	48
7.2.2 Měření v MPE Panter ...	49
8 Závěr	50
Literatura	52
A Symboly a zkratky	55
A.1 Zkratky	55
A.2 Symboly	56
B Obsluha rentgenového zářiče	57
C Obsah příloženého CD	58

Tabulky / Obrázky

1.1. Energie charakteristického záření pro vybrané prvky	6
2.1. Klasifikace čistých prostor	13
5.1. Příkazy pro ovládání spektrometru SXD	36
7.1. Naměřené parametry modulů KB-6500	46
7.2. Naměřené parametry modulů KB-6500	48
1.1. Rentgenová obloha z teleskopu eROSITA	3
1.2. Schematický obrázek rentgenky	5
1.3. Ukázka naměřeného spektra přístrojem Ketek na Ti anodě ...	6
1.4. Závislost odrazivosti na úhlu a typu vrstvy	7
1.5. Schematické znázornění uspořádání optiky typu Wolter I.....	8
1.6. Detail čela optiky XMM-Newton	8
1.7. Uspořádání konkávních zrcadel v optice Kirkpatrick–Baez ...	9
1.8. Snímek z původního mikroskopu Kirkpatrick a Baez	9
1.9. Snímek račího oka z elektronového mikroskopu	10
1.10. Porovnání alternativních návrhů optiky typu račí oko.....	10
1.11. Rozložení intenzity záření v ohniskové rovině račího oka .	10
1.12. Přehled úrovně technologické připravenosti	11
3.1. Laboratoř optiky FS ČVUT ...	14
3.2. Instalace kolimátoru v Laboratoři optiky FS ČVUT	15
3.3. Termovakuová komora s demonstrátorem	16
3.4. Nainstalovaná rentgenka ve VZLU	17
3.5. Schematické znázornění zařízení MPE Panter	17
3.6. Schematické znázornění vakuové komory MPE Panter.....	18
3.7. Detektory v instalované v MPE Panter	18
3.8. Plánek místností a jeřábů vstupní komory MPE Panter ..	19
4.1. Timepix osazený na desce	20
4.2. Srovnání spektrální účinnosti Timepixu	21
4.3. Timepix QUAD	21
4.5. Rentgenový spektrometr Ketek	23

4.6.	Blokový diagram spektrometru	23
4.7.	Zapojení zemí spektrometru Ketek	24
4.8.	Měření Ketekem při chybném uzemění	24
4.9.	Rentgenový spektrometr SXD .	25
4.10.	Spektrální odezva Hamamatsu CCD	26
4.11.	Ukázka Hamamatsu DCam-USB.....	26
7.1.	Snímek ohniska pro různé fokální vzdálenosti	43
7.3.	Snímek společného ohniska horizontálního modulu	44
7.4.	společné ohnisko horizontálního modulu po zprůměrování sloupců jednotlivých barevných kanálů	45
7.5.	Snímek středu ohniska horizontálního modulu pro různé vzdálenosti.....	45
7.6.	Vzdálenosti optiky a detektorů v MPE Panter	46
7.7.	Hledání ohniska horizontálního modulu optiky	47
7.8.	Hledání ohniska vertikálního modulu optiky.....	47
7.10.	Automatické změření demonstrátoru v náklonech	48
7.11.	Demonstrace zorného pole demonstrátoru sestavená z 9 měření	49
7.12.	Zisk optiky v závislosti na energii	49
B.1.	Ovládání rentgenky ve VZLU .	57

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Škvor** Jméno: **Matyáš** Osobní číslo: **383129**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra fyziky**
Studijní program: **Letectví a kosmonautika**
Studijní obor: **Avionika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Integrace měřicího řetězce s detektorem Timepix pro termovakuovou komoru

Název diplomové práce anglicky:

Integration of measuring chain with Timepix detector for thermo vacuum chamber

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši současného stavu problematiky s ohledem na aparaturu vakuového tunelu ve VZLU Letňany
- 2) Vytvořte návrh měřicího řetězce pro testování RTG optiky ve vakuovém tunelu
- 3) Využijte detektorů Timepix, Ketek a SXD VZLU
- 4) Navrhněte SW pro ovládání 3D křížového stolku v programovém prostředí Python
- 5) Navrhněte způsob připojení detektorů a následné vyhodnocení obrazu z 2D nezobrazující optiky typu MFO (Multifoil Optic)
- 6) Integraci proveďte na embdeded platformě PICO-KBU4

Seznam doporučené literatury:

- 1) Dereniak, E.; Grove, D. Optical Radiation Detectors; John Wiley & Sons, 1984.
- 2) VITUS Silicon Drift Detectors, 2021, www.ketek.net/wp-content/uploads/2017/10/KETEK_Manual_VITUS_SDD_REV6_2017-10.pdf
- 3) Brezina, C.; Gaspari, Y.; et al. The Timepix3 chip, 2021. https://indico.cern.ch/event/267425/attachments/477859/661149/Timepix3_final.pdf

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Ladislav Sieger, CSc., katedra fyziky FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **15.06.2021** Termín odevzdání diplomové práce: **04.01.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **19.02.2023**

Ing. Ladislav Sieger, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Ondřej Jiříček, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Kapitola 1

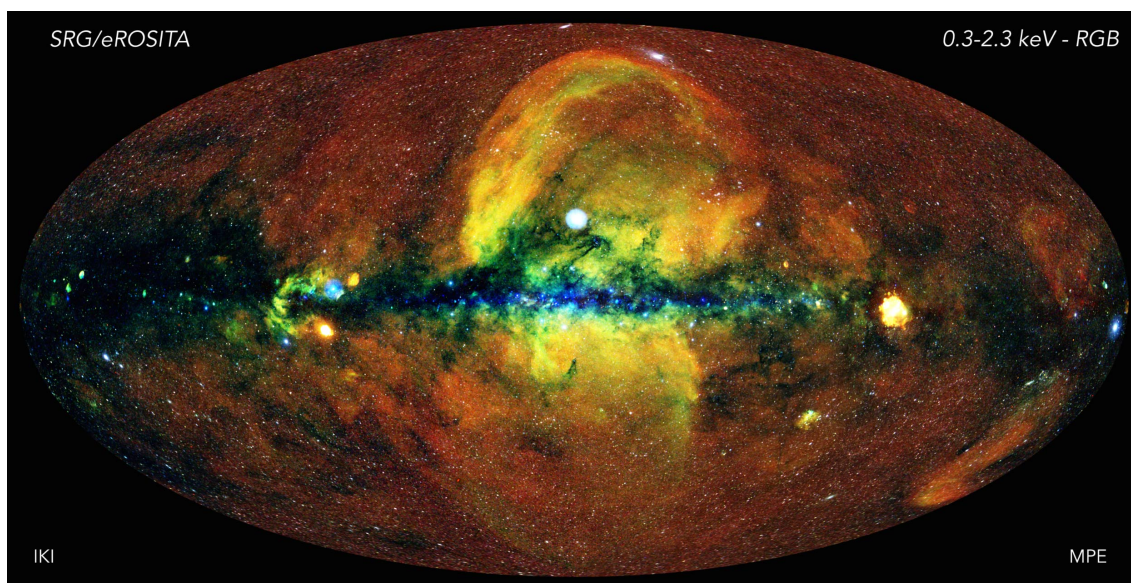
Úvod

Rentgenová astronomie umožňuje realizovat jinak nerealizovatelná pozorování extrémně horkých, či energetických jevů jako jsou výbuchy supernov, rodící se mladé hvězdy, okolí černých děr a další. Jedná se však o velmi náročnou disciplínu, jelikož záření neproniká atmosférou, veškerá pozorování musí být prováděna ve vesmíru. Vzhledem k malé vlnové délce musí být záření v dalekohledech fokusováno soustavami precizních zrcadel s nerovnostmi o velikosti maximálně desítek atomů.

Vývoj rentgenových dalekohledů má v České Republice dlouhou tradici, první optika byla navržena již v 60. letech minulého století a řada z nich se stala součástí kosmických experimentů, včetně dvou českých satelitů VZLUSAT-1 a VZLUSAT-2. V Praze se každoročně pořádá mezinárodní konference o rentgenové optice v astronomii – AXRO.

V posledních letech se věnuje pozornost především dvěma oblastem, kterých se tato diplomová práce dotýká:

- Navržení ultralehké rentgenové optiky pro budoucí velké rentgenové teleskopy
- Vytvoření cubesatu¹ schopného změřit rentgenové spektrum přechodných jevů, například supernov



Obrázek 1.1. Rentgenová obloha z teleskopu eROSITA [2]

¹ CubeSaty jsou miniaturní satelity o rozměru 113x100x100 mm (1U), případně v násobcích těchto rozměrů (2U-20U). Vynášeny jsou jako sekundární náklad při vypouštění velkých satelitů. Díky tomu je vynesení cenově dostupné, například vynesení VZLUSAT-2 o velikosti 3U stálo 2 miliony korun.[1]

Současné projekty se snaží o ověření příslušných technologií v laboratorním prostředí a dosažení 4. úrovně technologické připravenosti (TRL 4)¹. Smyslem diplomové práce je přispět k těmto snahám automatizací měření a vyhodnocování parametrů rentgenových optik.

Prvním projektem je výroba a testování dvou modulů multifoliové optiky typu Kirkpatrick–Baez s ohniskem 6,5 metru (KB-6500). Druhým projektem je demonstrátor cubesatu, skládající se z rentgenové optiky, pixelového detektoru pro zaměření rentgenového zdroje a rentgenového spektrometru pro změření jeho spektra (demonstrátor).

Každá rentgenová optika prochází v průběhu svého několikaletého vývoje různými fázemi, ve kterých je potřeba provádět rozdílná měření. Z toho důvodu je nezbytné, aby měl celý systém maximálně modulární koncepci, která umožňuje měnit jeho jednotlivé části s ohledem na vývoj možných senzorů, driverů motorů a měnicích se požadavků zadavatele na vývoj systému v průběhu používání měřicího řetězce.

První část měření demonstrátoru byla prováděna v 15 m dlouhém rentgenovém tunelu v VZLU Letňany ve Praze. Zde byla ověřena koncepce řešení, rozchození jednotlivých částí (vakuové posuvné stolky, funkčnost propojení RTG senzorů) a ověření spolupráce jednotlivých částí programu. Optika KB-6500 byla vzhledem k délce svého ohniska v této fázi proměřována jen ve viditelném spektru.

Následně byly demonstrátor i KB-6500 umístěny na společnou konstrukci a ve vakuu vypékány, aby došlo k odplynění pro potřeby měření ve vakuovém tunelu Panter v Mnichově, který má vzhledem ke svým parametrům řádově vyšší nároky na čistotu měřených experimentů.

Druhá část měření byla prováděna v ústavu Maxe Plancka v Mnichově, kde byla celá aparatura instalována ve 120m rentgenovém tunelu. Zde byly, v rámci dvoutýdenní měřicí kampaně za využití připraveného měřicího řetězce, změřeny parametry jak celého demonstrátoru, tak i optiky KB-6500.

Podařilo se ověřit funkčnost celého měřicího řetězce a zautomatizovat některá měření tak, že zaberou jen zlomek původního času. Výsledky této práce budou využity při vývoji budoucích rentgenových optik.

Následující podkapitoly slouží jako přehledné shrnutí pojmů a technologií, které jsou nezbytné pro orientaci v problematice vývoje rentgenových optik pro vesmírné aplikace a infrastruktury potřebné pro jejich testování v pozemních podmínkách.

1.1 Rentgenové záření

Za rentgenové záření se označuje elektromagnetické záření o vlnových délkách v rozmezí od 10 nm po 10 pm, respektive fotony s energií 124 eV - 124 keV. Vztah mezi vlnovou délkou a energií jednotlivých fotonů je:

$$E = h \cdot f = \frac{f \cdot c}{\lambda} [J]$$

Kde:

$h = 6,62607015 \cdot 10^{-34} Js$	Planckova konstanta
λ [m]	Vlnová délka fotonu
$c = 299792458 \text{ ms}^{-1}$	Rychlost světla
E [J]	Výsledná energie fotonu

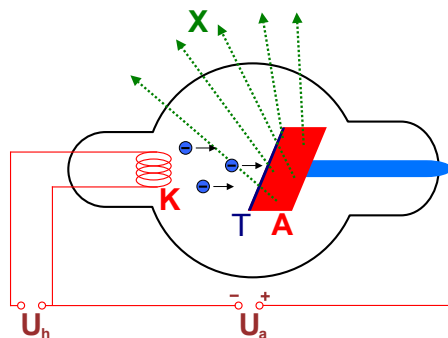
Přírozeným zdrojem rentgenového záření jsou hvězdy a radioaktivní rozpad. Jako umělé zdroje se používají především rentgenové lampy–rentgenky.

¹ Jedná se o devítibodovou škálu popsanou v kapitole 1.3

Měření intenzity a spektra rentgenového záření má široké uplatnění v lékařství (snímky kostí, zubů, měkkých tkání, CT), průmyslu (defektoskopie a kontrola vnitřních struktur) i astronomii.

1.1.1 Rentgenky

Elektronka je tvořena anodou a katodou, mezi které je přivedeno napětí 1-100 kV. Katoda obsahuje žhavicí vlákno, jímž vyemitované elektrony jsou vysokým napětím urychlovány směrem k anodě, na kterou velkou rychlostí dopadají. Při dopadu se více než 99 % jejich energie promění na teplo a část na energii fotonů rentgenového záření vystupujícího z anody. Intenzita rentgenového záření se odvíjí od počtu dopadajících elektronů, které je dáno žhavicím proudem vlákna katody.



Kde:

X	Rentgenové paprsky
K	Katoda
A	Anoda
T	Terčík anody
U_h	Žhavicí napětí
U_a	Anodové napětí

Obrázek 1.2. Schematický obrázek rentgenky [3]

Rentgenka emituje dva typy rentgenového záření – brzdné a charakteristické.

Brzdné záření – rychle letící elektrony se dopadem na anodu náhle zbrzdí a jejich kinetická energie se přemění na energii fotonů elektromagnetického záření. Toto záření obsahuje fotony všech vlnových délek, počínaje tzv. mezní vlnovou délkou λ_m . Spektrum brzdného záření je spojitě.

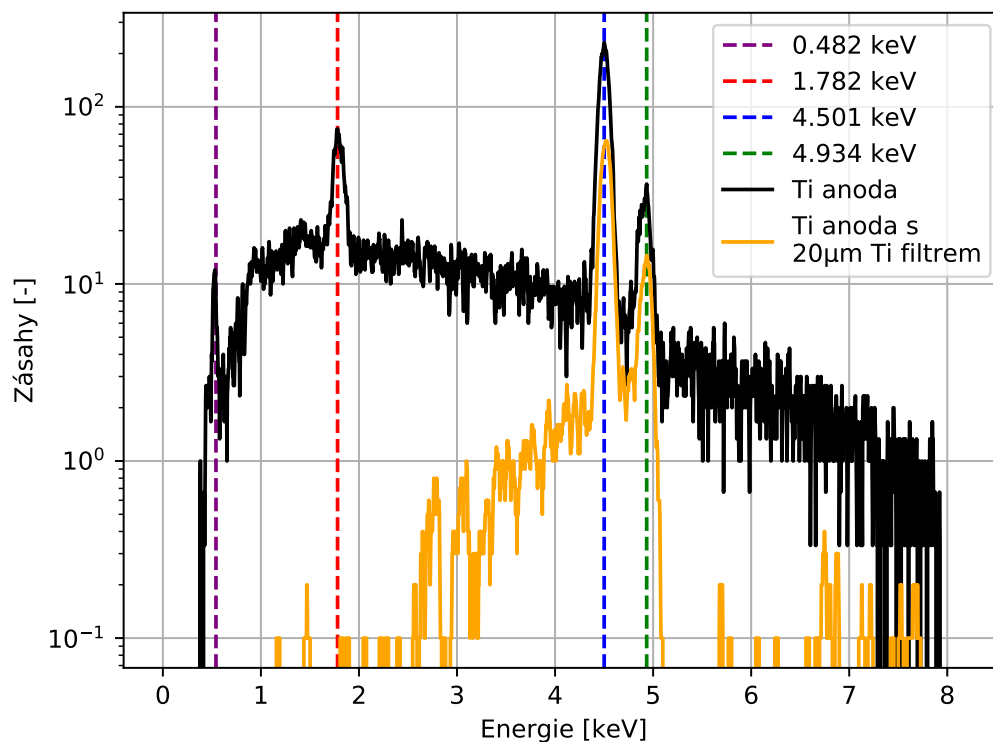
Charakteristické záření – elektron dopadající na anodu může vyrazit některý elektron z nejnižších hladin K nebo L atomu materiálu anody. Tím vzniká neobsazené místo, které je okamžitě obsazeno jiným elektronem z vnějších hladin. Při přechodu elektronu mezi těmito hladinami dochází k vyzáření fotonu s energií rovnou energetickému rozdílu mezi elektronovými hladinami. Charakteristické záření má proto čárové spektrum, které je závislé na materiálu anody. [4]

Charakteristické záření je dáno materiálem anody v místě dopadu, viz tabulka 1.1. Anoda může být celá z jednolitého materiálu, nebo může pro získání požadovaného záření obsahovat terčík z příslušného materiálu v místě dopadu.

V ukázce naměřených dat v grafu 1.3 je vidět spektrum titanového terčíku, včetně brzdného záření. Pro odfiltrování brzdného záření, respektive záření nižších energií, je možné použít filtry vyrobené z velmi tenkých kovových folií. V grafu jsou proložena dvě 60sekundová měření provedená spektrometrem Ketek. Obě měření proběhla s titanovou anodou při napětí 8 kV a žhavicím napětí 8 V v MPG Panter. Jedno měření proběhlo s 50 μm titanovým filtrem umístěným mezi rentgenku a spektroskop, druhé měření bylo bez filtru. Zajímavostí je spektrální čára na 1,782 keV, jedná se o M_α spektrální čáru wolframu, která je vytvořena atomy, které na anodu přemigrovaly z wolframového žhavicího vlákna. Vzhledem k napětí na anodě 8 kV není možné vidět L čáry s energiemi 8,40 - 11,29 keV, které by jinak byly v rozsahu přístroje. Jedná se o názornou ukázkou toho, že pro získání charakteristického záření stačí i velmi tenký povlak na anodě.

Prvek	Označení spektrálních čar podle hladiny, ze které byl uvolněn elektron								
	$K_{\alpha 1}$	$K_{\alpha 2}$	K_{β}	$L_{\alpha 1}$	$L_{\alpha 2}$	$L_{\beta 1}$	$L_{\beta 2}$	L_{γ}	M_{α}
Ag	22,16	21,99	24,94	2,98	2,98	3,15	3,35	3,52	
Al	1,48	1,49	1,56						
Au	68,80	66,99	77,98	9,71	9,63	11,44	11,58	13,38	2,12
Co	6,93	6,92	7,65	0,78	0,78	0,79			
Cr	5,41	5,41	5,95	0,57	0,57	0,58			
Cu	8,05	8,03	8,91	0,93	0,93	0,95			
Fe	6,40	6,39	7,06	0,71	0,71	0,72			
Ge	9,89	9,86	10,98	1,19	1,19	1,22			
Mg	1,25	1,25	1,30						
Mo	17,48	17,37	19,6	2,29	2,29	2,39	2,52	2,62	
Si	1,74	1,74	1,84						
Ti	4,51	4,50	4,93	0,45	0,45	0,46			
Tl	72,87	70,83	82,58	10,27	10,17	12,21	12,27	14,29	2,27
V	4,95	4,94	5,43	0,51	0,51	0,52			
W	59,32	57,98	67,24	8,40	8,34	9,67	9,96	11,29	1,78
Zn	8,64	8,62	9,57	1,01	1,01	1,03			

Tabulka 1.1. Energie charakteristického záření pro vybrané prvky v keV [5]



Obrázek 1.3. Ukázka naměřených rentgenových spekter přístrojem Ketek

1.2 Optiky pro rentgenovou astronomii

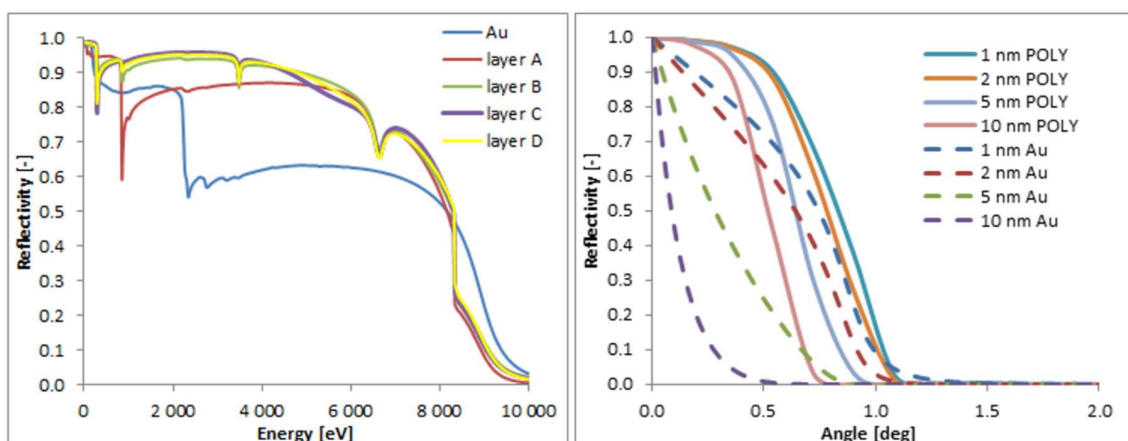
Na rozdíl od viditelného spektra je pro rentgenové záření princip refrakce prakticky nevyužitelný^{1,2}, protože rentgenové záření většinou materiálů prochází, aniž by docházelo k významnější změně jeho směru.

Nejrozšířenější způsob zaostřování paprsků je prostřednictvím totálního odrazu od zrcadel. Aby bylo totálního odrazu dosaženo, musí paprsek dopadat pod úhlem menším než je kritický úhel α_{krit} (1), obvykle pod 1° . Koeficient odrazivosti zrcadla závisí na jeho mikrodrušnosti (typicky pod 1 nm) a energii odráženého záření. Zrcadla jsou tvořena řadou velmi tenkých vrstev z vhodných materiálů, jako jsou například zlato, wolfram, ruthenium a hliník. [7]

$$\alpha_{krit} \approx \frac{1,65}{E} \sqrt{\frac{Z}{A} \rho} \quad (1)$$

kde:

- E [keV] je energie záření
- Z je protonové číslo materiálu reflektoru
- A relativní atomová hmotnost
- ρ [$\frac{g}{cm^3}$] je hustota



Obrázek 1.4. Závislost odrazivosti na úhlu dopadu pro různé multivrstvy - RMS = 2 nm (vlevo). Odrazivost vícevrstev v různých úhlech pro 4,5 keV (vpravo) [8]

1.2.1 Wolterova optika

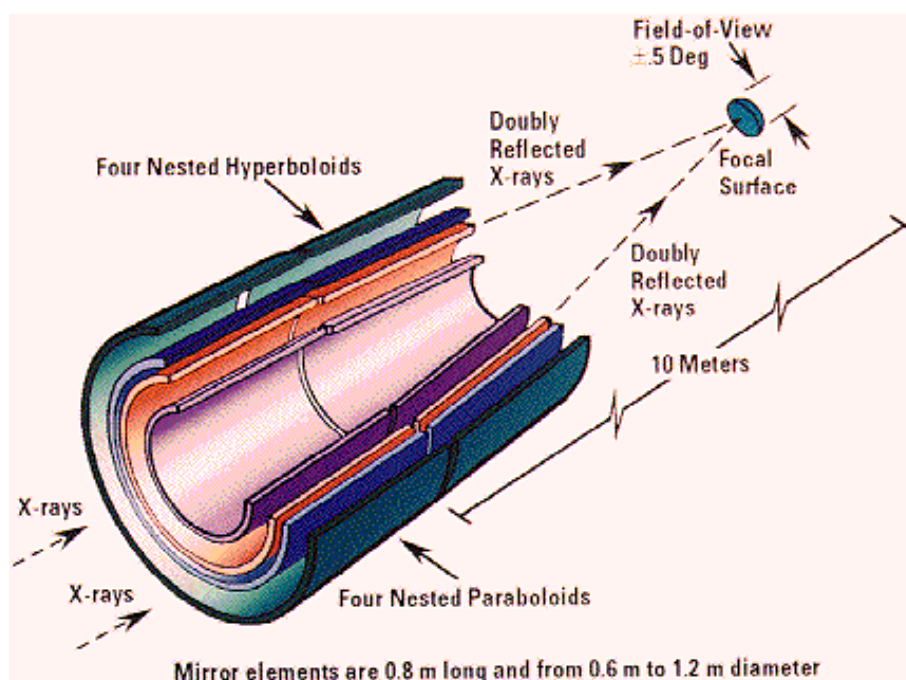
Na družicích je s oblibou využívána Wolterova optika (eRosita, AXAF–Chandra, XMM–Einstein, ROSAT, ...). Optika je založena na dvojitým odrazu od dvou povrchů. Nejčastěji je využívána kombinace paraboloidu a hyperboloidu (Wolter I), ale existují i další konfigurace (Wolter I, II, III).

Optické povrchy jsou vyráběny metodou replikace, kdy jsou na kuželovou formu (mandrel) nanášeny nejdříve odrazivé vrstvy, následně nosný materiál a na konci je

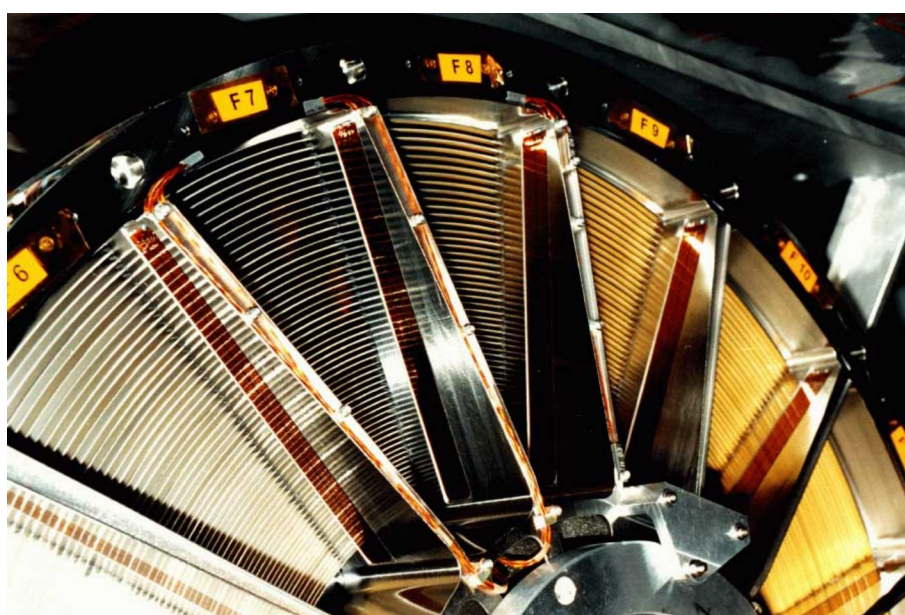
¹ Existují objektivы s vysokou světelností (okolo f/1) označované jako rentgenové, nejedná se však o objektivы určené pro rentgenové záření, ale pro snímání luminiscenčních stínítek, která emitují záření ve viditelném spektru.

² Proběhla řada experimentů s refraktivními optikami pro energie 5–40 keV. Ty jsou vytvořeny z řady válcových otvorů o velikosti do 1 mm v bloku například hliníku, či beryllia. Materiál mezi otvory se chová jako řada konkávních čoček a refraktivně zaostřuje rentgenový paprsek do ohniska. [6]

z trnu sejmuto hotové kuželovité zrcadlo, které má velmi tenkou stěnou. Optiky se obvykle skládají z většího množství takovýchto zrcadel ve společném tubusu.



Obrázek 1.5. Schematické znázornění uspořádání optiky typu Wolter I [9]

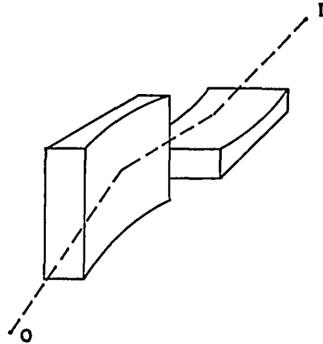


Obrázek 1.6. Detail čela optiky družice XMM-Newton skládající se z 58 soustředných zrcadel [10]

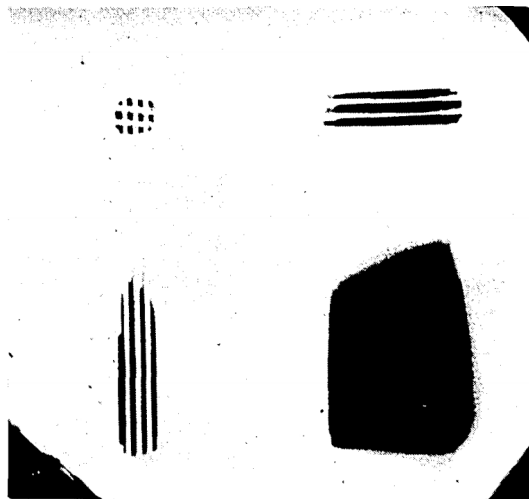
1.2.2 Kirkpatrick–Baez

Optika typu Kirkpatrick-Baez byla jako první rentgenová optika navržena dvojicí Kirkpatrick a Baez ve 40. letech 20. století. Optika se skládá ze dvou na sebe kolmých konkávních zrcadel viz. obrázek 1.7, která zaostřují obraz do ohniska, každý v jedné ose. Dvojice systém nejen navrhla, ale i s touto optikou sestrojila mikroskop [11]. Pro

astronomická pozorování byl tento typ optiky použit pouze v počátcích rentgenové astronomie. Při konstrukci optiky jako multifoliové by se však mohlo jednat o levnější alternativu k optice typu Wolter.[12]



Obrázek 1.7. Uspořádání konkávních zrcadel v optice Kirkpatrick–Baez [11]

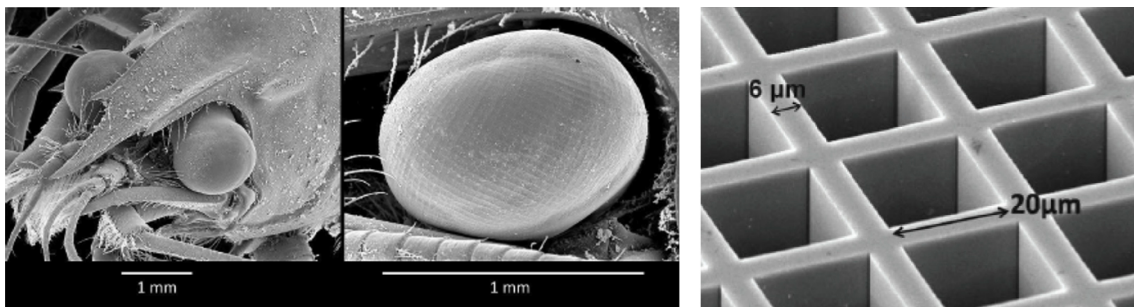


Obrázek 1.8. Snímek mikroskopu, na kterém byla optika prvně testována. V levém horním rohu je ohnisko optiky prosvítající železnou sítkou s hustotou 19000 oček/cm². Po jeho stranách jsou částečné obrazy, každý tvořený pouze jedním zrcadlem. Černý flek v pravém dolním rohu je přímý průsvit z rentgenky [11]

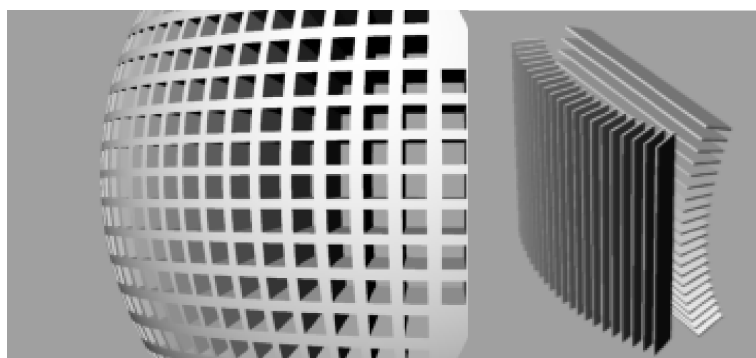
1.2.3 Optika typu Račí oko

Jak již název napovídá, jedná se o optiku inspirovanou račím okem (obrázek 1.9), to se skládá z tisíců čtvercových mikrokanálek. Stěny tunelů odráží světlo do ohniska, ve kterém jsou receptory. Oko je tak schopné pokrývat široké zorné pole.

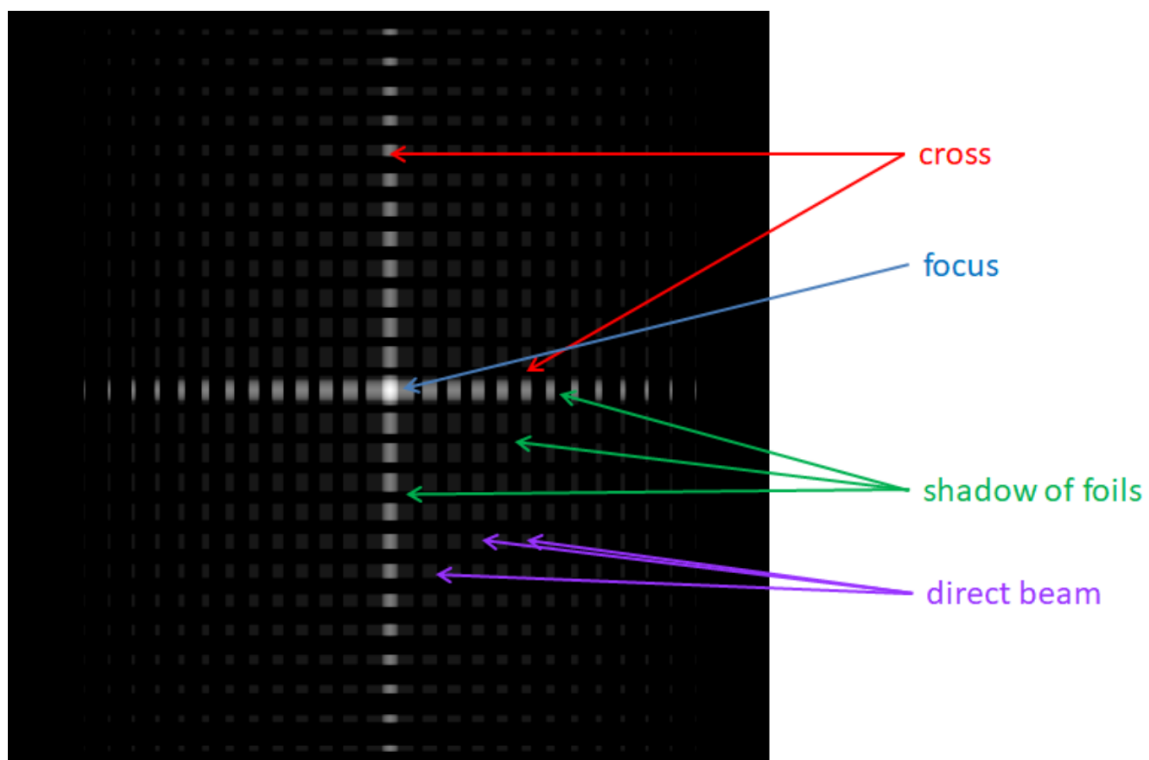
Dalekohled typu račí oko se může skládat z mikrokanálek, to je však extrémně náročné na výrobu. Častěji se proto používá Schmidtovo uspořádání skládající se ze dvou sad rovinných zrcadel, obrázek 1.10. Každá sada zrcadel zaostří v jedné ose a pokud jsou oba moduly za sebou, vzniká bodové ohnisko s charakteristickým křížem po stranách.



Obrázek 1.9. Snímek račíchho oka z elektronového mikroskopu [13]



Obrázek 1.10. Porovnání alternativních návrhů račíchho oka. Nalevo úhlové uspořádání složené z mikrokanáleků, napravo Schmidtovo uspořádání skládající se ze dvou sad rovinných zrcadel [14]



Obrázek 1.11. Simulovaný 2D pohled na rozložení intenzity záření v ohniskové rovině račíchho oka, ukazující charakteristický křížový vzor [14]

1.2.4 Multifóliová optika

Nevýhodou replikované optiky jsou relativně vysoká váha a extrémní náročnost výroby. Multifóliová optika je založena na použití většího množství rovných křemíkových destiček, na které jsou nanášeny mikrovrstvy odrážející rentgenové záření. Destičky mohou být vyrobeny z komerčně dostupných desek pro výrobu mikročipů, což značně snižuje náklady na výrobu.

Tyto destičky mohou být použity jak ve Schmidově uspořádání račích oka, tak v optice typu Kirk-Patrick Baez, kde jsou destičky lehce prohnuty, nebo je parabolický tvar zrcadla aproximován množinou rovinných zrcadel.

1.3 Úroveň technologické připravenosti

Úroveň technologické připravenosti (TRL) je jednotná stupnice popisující míru zralosti technologie, kterou zavedla NASA v 70. letech 20. století. Stupnici s drobnými obměnami přijala ESA i další agentury a je definována mezinárodní normou ISO 16290:2013. Použití TRL umožňuje konzistentní stanovení technické vyspělosti různých typů technologií od různých dodavatelů. Stupnice začíná od TRL 1 a končí u TRL 9, kde TRL 1 je nejnižší míra připravenosti a TRL 9 nejvyšší.

TRL není přiřazena konkrétní technologii, pokud má být použita v jiném prostředí, na které jsou kladeny jiné požadavky, musí být TRL sníženo. Aby systém dosáhl určitého TRL, musí mít všechny jeho subsystémy TRL stejné, nebo vyšší. Při vývoji není nutné, aby technologie postupně prošla všemi stupni, je možné stupně přeskakovat a dosahovat rovnou vyšších.

Úrovně technologické připravenosti (TRL)		
Stupeň	Název	Popis
TRL 0	Nápad	Neověřený koncept, neproběhlo žádné testování
TRL 1	Základní výzkum	Popsání nějakého jevu na základní úrovni
TRL 2	Technologická formulace	Vypracování technologického záměru
TRL 3	Aplikovaný výzkum	Experimentální ověření schůdnosti záměru
TRL 4	Prototyp malého rozsahu	Ověření záměru na laboratorní úrovni
TRL 5	Prototyp velkého rozsahu	Ověření technologie na úrovni prototypu v modelovém prostředí
TRL 6	Prototypový systém	Funkce technologie prokázána ve skutečném prostředí
TRL 7	Vzorový systém	Provoz technologie ve skutečných souvislostech a prostředí
TRL 8	První komerční systém	Kompletní systém připravený pro výrobu
TRL 9	Plné komerční nasazení	Technologie dostupná zákazníkům

Obrázek 1.12. Přehled úrovní technologické připravenosti TRL¹

Kapitola 2

Technické požadavky na vývoj kosmických aplikací

Cílovou aplikací rentgenové optiky je vesmírné prostředí, z toho důvodu je nutné dodržet specifické požadavky na čistotu a výběr materiálů s ohledem na outgasing. Práce musejí probíhat v čistých prostorech a testování je možné jen ve vakuových komorách s tunelem na jehož konci je zdroj rentgenového záření. Rentgenové tunely jsou unikátní zařízení, kvůli nimž je třeba cestovat do různých států. V ČR je 15 m dlouhý tunel ve VZLU v Praze. Nejbližší delší tunel je v Mnichově. Zde jsou zmiňovány pouze požadavky na konstrukci optiky s ohledem na použití ve vakuu. Nejsou zmiňovány požadavky na radiační, rázovou, tepelnou odolnost atd., které se používají při testování konstrukčních dílů při stavbě družic.

2.1 Rentgenové tunely

Testovaná optika je určena pro měkké rentgenové záření s energiemi menšími než 8 keV. Záření na takto nízkých energiích je ve vzduchu rychle pohlcováno a proto je nutné provádět měření s rentgenovým zdrojem ve vakuu. Pro testování je dále nutné, aby se geometrie rentgenového svazku co nejvíce blížila svazku paralelnímu, toho může být dosaženo pouze maximalizací vzdálenosti mezi rentgenkou a optikou uvnitř vakuové komory. Zařízení pro provádění testů se tedy skládá z vakuové komory s montážními prvky pro umístění optiky, na kterou navazuje vakuový tunel, na jehož konci je rentgenka.

Aby nebylo nutné při změně rentgenky, nebo optiky vyčerpávat celé zařízení znovu, bývají od sebe jednotlivé sektory komory odděleny vakuovými šoupaty, která vakuově oddělují jednotlivé části aparatury.

Vakuové pumpy

Pro dosažení dostatečné kvality vakua v komoře se obecně používá dvou typů vývěv, rotační a turbomolekulární.

Rotační vývěva slouží jako první stupeň, který je schopen čerpat od atmosferického tlaku. Po vyčerpání komory na tlak řádově 0,1 Pa není schopna dosáhnout nižšího tlaku. V tuto fázi je před rotační vývěvu předřazena turbomolekulární vývěva, jejíž výstup je však nadále rotační vývěvou odčerpáván. Takto je možné dosáhnout v komoře tlaku až 10^{-9} Pa.

Plynění materiálů

Ze všech materiálů se po snížení tlaku v komoře začnou postupně uvolňovat plyny, které se do nich dostaly v průběhu výroby. Tyto plyny prodlužují čas nutný pro dosažení požadované kvality vakua a zároveň mohou kontaminovat jiné části zařízení, především kryogenně chlazené senzory, na kterých by tyto plyny namrzaly a mohly je poškodit. Některé materiály jsou pro svoji porozitu pro použití ve vakuu zcela nevhodné. Jedná

se například o polymery, lepidla, gumy, epoxidy a eloxované povrchy. Před umístěním měřené aparatury do rentgenového tunelu je potřeba provést odplynění, často spojené i s vypékáním za zvýšené teploty. To probíhá tak, že se experiment umístí do termovakuové komory, ve které je po odčerpání vzduchu zvýšena teplota, což odplynění značně urychlí.

ESA specifikuje testovací procedury pro určení míry plynění materiálu standardem ECSS-Q-ST-70-02C.

2.2 Čisté prostory

Mezi hlavní požadavky patří bezprašnost prostředí. Prach je nutné eliminovat z několika hlavních důvodů:

- Může se dostat na optiku a degradovat její parametry rozptylem dopadajícího záření
- Kontaminuje vakuovou komoru, a zařízení v komoře umístěné
- Z důvodu outgasingu trvá déle dosáhnoutí cílového vákua

Aby bylo bezprašnosti dosaženo, je veškerý vstupující vzduch filtrován. Do prostor není možné vnášet materiály, ze kterých by se uvolňovala vlákna a další nečistoty.

Největším zdrojem znečištění je však přítomnost lidí. Aby bylo toto znečištění minimalizováno, je nutné omezit množství přítomných osob na nezbytné minimum a všechny vstupující vybavit ochrannými prostředky, které se odvíjejí od požadovaného stupně čistoty prostor. Konkrétně se jedná o:

- Boty
- Plášť/kombinéza
- Kukla/sítka na vlasy
- Rouška
- Rukavice

Formálně se čisté prostory dělí do devíti tříd definovaných normou ISO 14644-1[15], respektive FS 209E v USA. Třídy čistoty jsou rozlišovány dle počtu částic jednotlivých velikostí na jednotku objemu.

Klasifikace	Maximální limity koncentrace (částic/ m^3 vzduchu) pro částice rovnající se a větší než uvažované velikosti					
	0,1 μm	0,2 μm	0,3 μm	0,5 μm	1 μm	5 μm
ISO 1	10					
ISO 2	100	24	10			
ISO 3	1 000	237	102	35		
ISO 4	10 000	2 370	1 020	352	83	
ISO 5	100 000	23 700	10 200	3 520	832	
ISO 6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293
ISO 7				352 000	83 200	2 930
ISO 8				3 520 000	832 000	29 300
ISO 9				35 200 000	8 320 000	293 000

Tabulka 2.1. Klasifikace čistých prostor dle ČSN ISO 14644-1 [5]

Kapitola 3

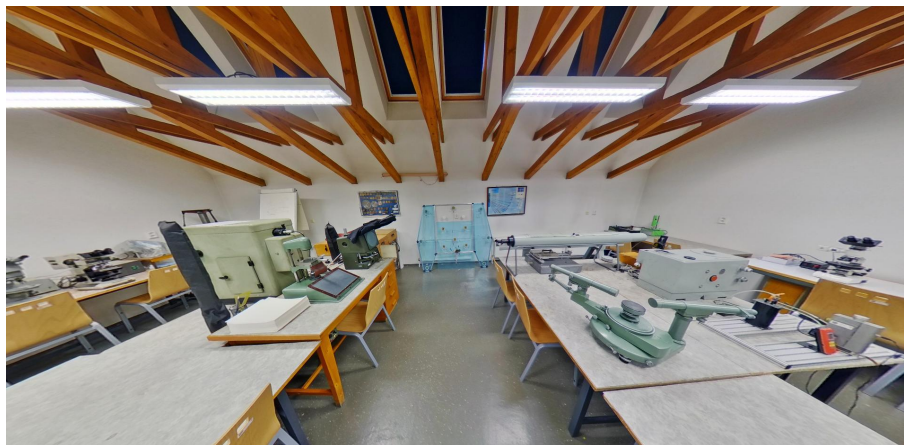
Pracoviště pro testování optiky

Tato kapitola přehledně shrnuje dostupná pracoviště pro testování rentgenových optik. Účelem optiky ve vesmírném teleskopu je soustředit fotony z velmi vzdálených rentgenových zdrojů, tedy prakticky z nekonečna. Z toho plyne, že pro věrné napodobení podmínek vesmírného teleskopu v pozemních podmínkách je zapotřebí vakuový tunel o co největší délce. Vybudování i provoz takového pracoviště je velmi nákladné a je jich po světě velmi málo. Dostupnější alternativou, kterou lze vhodně využít zejména při testování v jednotlivých fázích vývoje rentgenové optiky, je testování v paralelním svazku viditelného záření. To sice nemůže nahradit testování v rentgenovém spektru, může však odhalit problémy s optikou před nákladnými testy v rentgenovém tunelu. Je však třeba mít na paměti ohybové a difrakční jevy v optické části spektra, které se v rentgenu nevyskytují a mohou vést k zavádějícím interpretacím naměřených dat. S ohledem na tento fakt je zřejmé, že pro úspěšné otestování rentgenové optiky je vždy zapotřebí kombinace obou přístupů.

3.1 Laboratoř optiky FS ČVUT

Pro měření KB-6500 je nutná alespoň 7 metrů dlouhá temná místnost vybavená dostatečně velkým kolimátorem. Těmto požadavkům vyhovuje Laboratoř optiky Fakulty Strojní ČVUT v Dejvicích, která obsahuje dostatečně velký zatemněný prostor vybavený optickými lavicemi. Jedna lavice je opatřena kolimátorem o průměru 30 cm a dostatečným prostorem pro umístění optiky do paralelního svazku. Mobilní lavice může být umístěna do ohniska optiky a použita pro jeho snímání.

Chce to nějakou akci. Např. pro ověření funkčnosti, sousostí atd. testované optiky ve viditelné oblasti, byla použita optická laboratoř FS ČVUT s , zmínit důležité optické parametry. Tím ale není informace, že to bylo v 7 m dlouhé hale. Důležitý je kolimátor, délka optické dráhy, možnost overit X Y.



Obrázek 3.1. Laboratoř optiky FS ČVUT



Obrázek 3.2. Instalace kolimátoru v Laboratoři optiky FS ČVUT

3.2 Laboratoř satelitů VZLU

Laboratoř satelitů je součástí vesmírné divize VZLU a slouží především pro konstrukci a testování malých satelitů a jejich součástí. Pracoviště se skládá především z čistých prostor pro konstrukci a testování satelitů, termovakuovou komorou s rentgenovým tunelem a zařízeními pro provádění vibračních i rázových zkoušek.

3.2.1 Čisté prostory

Ve VZLU Praha jsou k dispozici dvě místnosti odpovídající ISO 7 a ISO 8. Do obou se vchází přes šedou místnost, sloužící pro obléknutí pláště, návleků a sítky na vlasy. Dále je v ní prostor pro vybalení vnášených zařízení z transportních obalů. Osoby vstupující do čistých prostor nesmí být oblečeny do ošacení, které zadržuje prach (např. svetr).

Místnost ISO 8 má velikost 32 m², slouží především pro sestavování a testování satelitů. Druhá místnost je kategorie ISO 7, má plochu 25 m² a je do ní umístěna termovakuová komora. Do místnosti ISO 7 se vstupuje skrz vzduchovou sprchu, která slouží k odstranění prachu.

3.2.2 Termovakuová komora

Termovakuová komora je umístěna v prostorech o čistotě ISO 7. Objem komory je 1 m³, maximální rozměry předmětu pro testování v komoře 850 x 950 x 800 mm. Zbytek prostoru je obsazen tepelnými štíty, které mohou regulovat teplotu v komoře v rozmezí -70°C až 150°C. Teplotu v komoře je možné měřit 16 termočlánky, které mohou být nalepeny kamkoli na štíty a experiment. Komora je propojena s tunelem o délce 15 m, na jehož konci je umístěna rentgenka. Komora je odčerpávána rotační a turbomolekulární vývěvou. Pro zavzdušnění komory je použit přefiltrovaný vzduch z čistých prostor, nebo je možné komoru napustit dusíkem, který neobsahuje vzdušnou vlhkost.



Obrázek 3.3. Termovakuová komora s demonstrátorem. Vnitřní prostor je obložen měděnými štíty, okolo kterých je tepelná izolace. Experiment je orientován svojí podélnou osou na vstup 15m rentgenového tunelu

K elektrickému propojení experimentu v komoře s vnějším světem slouží vakuové průchodky umístěné na vnější stěně termovakuové komory. Umístěny jsou ve třech řadách po pěti pozicích. Dvě jsou dále k dispozici v postranních dveřích.

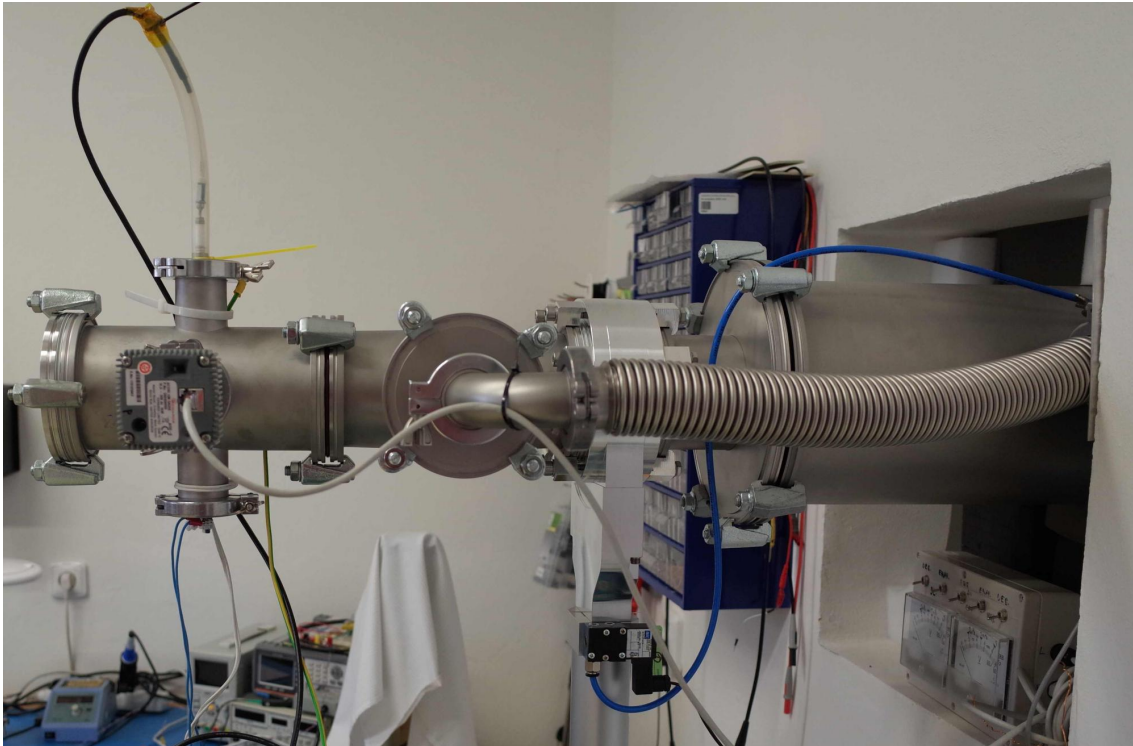
Typ průchodky	počet
1x Canon 9 pin	2
1x Canon 15 pin	
1x VGA 15 pin	
1x Canon 9 pin	2
1x Canon 15 pin	
1x Canon 51 pin	6

Tabulka 3.1. Standardně instalované průchodky v termovakuové komoře VZLU

3.2.3 Rentgenový zářič

Rentgenový tunel je vybaven rentgenkou s výměnnými anodami. Rentgenka je od tunelu oddělena vakuovým šoupětem. Díky němu je možné měnit anody při vyčerpané komoře bez nutnosti zavzdušnění celé komory. Před výměnou je šoupě zavřeno a prostor rentgenky napuštěn přes vzduchové filtry. Po výměně je prostor rentgenky odčerpán rotační a turbomolekulární vývěvou. Po vyrovnání tlaků může být šoupě otevřeno a rentgenka znovu používána. Výměna anody za jiný typ díky tomu trvá pouhou hodinu.

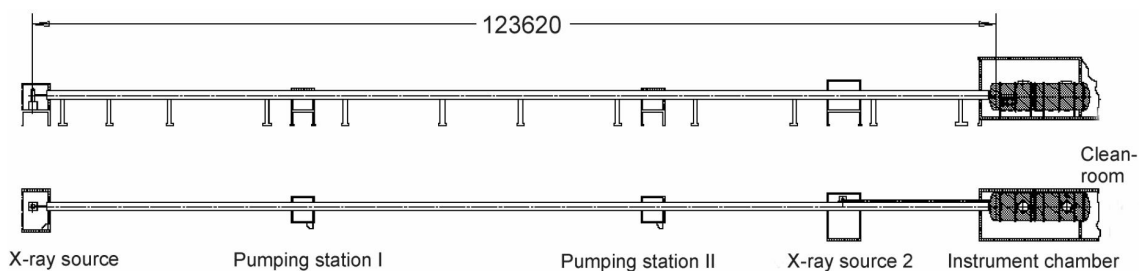
Obsluha rentgenky je popsána v příloze B.



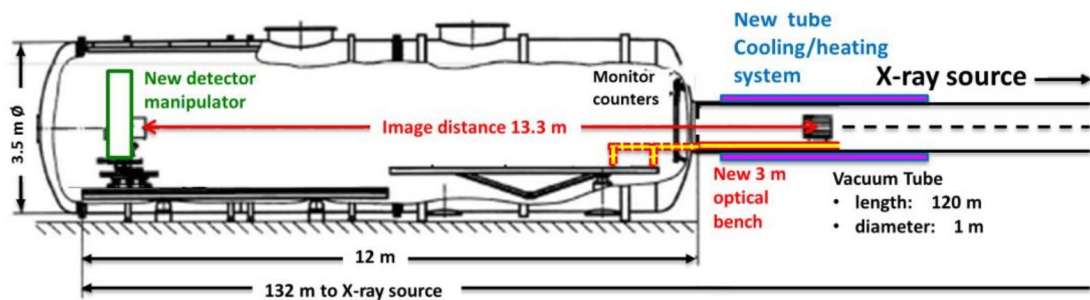
Obrázek 3.4. Fotografie zobrazuje – odleva: napájení anody a žhavení, senzor tlaku, odbočka z tunelu pro odčerpání po výměně rentgenky, vakuové šoupě, vstup do rentgenového tunelu. Samotná termovakuová komora se nachází až ve třetí místnosti.

3.3 MPE Panter

MPE Panter je testovací laboratoř pro rentgenovou optiku vybudovaná v rámci Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics v Mnichově (MPE) v roce 1981 pro potřeby testování zrcadel rentgenového družicového dalekohledu ROSAT o průměru 0,84 m a ohnisku 2,4 m. Následně byl pro potřeby mise XMM-Newton rozšířen do současné podoby. Zařízení se skládá z vakuové komory pro experimenty, 120 m dlouhého vakuového tunelu o průměru 1 m a zdroje rentgenového záření. Pro svoji rozlehlost je systém umístěn do několika budov. Experimenty jsou umístěny do vakuové komory o délce 12,5 m a průměru 3,5 m, uvnitř které mohou být posouvány a nakláněny s přesností $3 \mu\text{m}$ a 1 arcsec. Celé zařízení je před použitím vyčerpáno na minimálně 10^{-4} Pa několika čerpacími stanovišti umístěnými podél tunelu. Hlavní komora je dále vybavena dvěma kryogenními pumpami, každá s čerpací rychlostí $160 \text{ m}^3/\text{s}$. Ty snižují parciální tlak vodních par o další řád, aby zabránily namrzání vychlazených CCD detektorů.



Obrázek 3.5. Schematické znázorění zařízení MPE Panter [16]



Obrázek 3.6. Schematické znázornění vakuové komory MPE Panther [17]

3.3.1 Zdroje záření

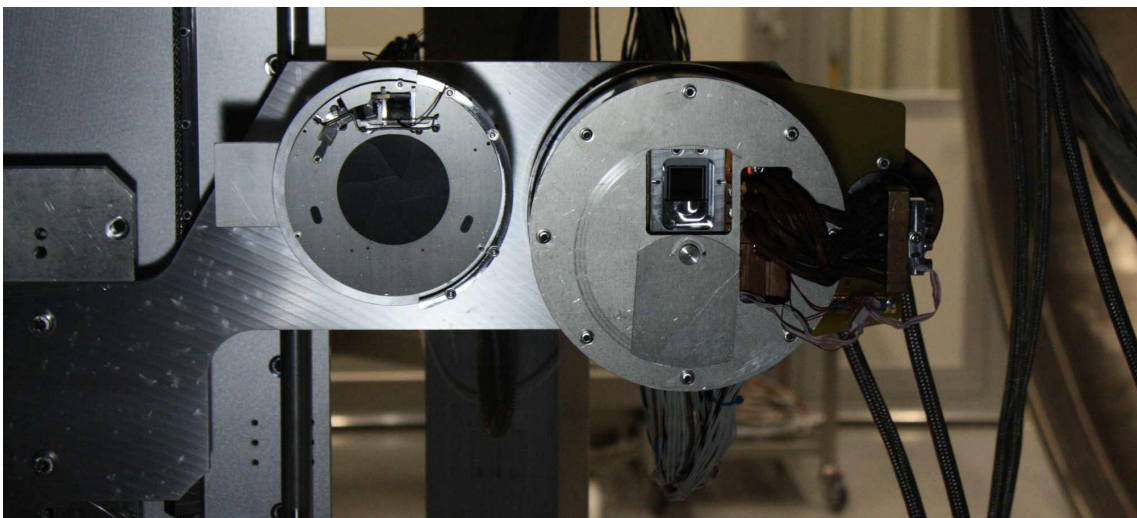
Vstup do rentgenového tunelu je v samostatné budově a je oddělen vakuovým šoupětem. Bez nutnosti zavzdušnění tunelu je tak možno přepínat mezi čtyřmi zdroji rentgenového záření a laserem. Ten slouží pro seřízení měřené optiky do jedné osy s tunelem a rentgenkou. Jeden ze zdrojů záření je automatizovaný a ovladatelný z velína bez nutnosti fyzického přístupu. Je v něm k dispozici 16 různých anod a dvě kola s filtry. v každém je 15 filtrů a jedna prázdná pozice pro získání nefiltrovaného záření. Materiály elektrod jsou v tabulce 1.1. Za filtry je umístěný rentgenový spektrometr, který slouží pro rychlou kontrolu výstupního spektra a intenzity záření.

Rozsah energií	0,18 – 8,04 keV
Maximální napětí na anodě	15 kV
Vzdálenost od zdroje k prvnímu filtru	250 mm
Vzdálenost mezi filtry	26 mm
Průměr filtrů	20 mm

Tabulka 3.2. Technické parametry rentgenového zdroje s polo-automaticky výměnnými anodami

3.3.2 Detektory

Komora je fixně opatřena dvěma detektory na rameni, které je pohyblivé ve třech osách. Je tak možné detailně zmapovat celé ohnisko měřené optiky. Data z obou senzorů jsou ukládána ve formátu FITS.



Obrázek 3.7. Detektory v instalované v komoře. Nalevo PIXI napravo TRoPIC

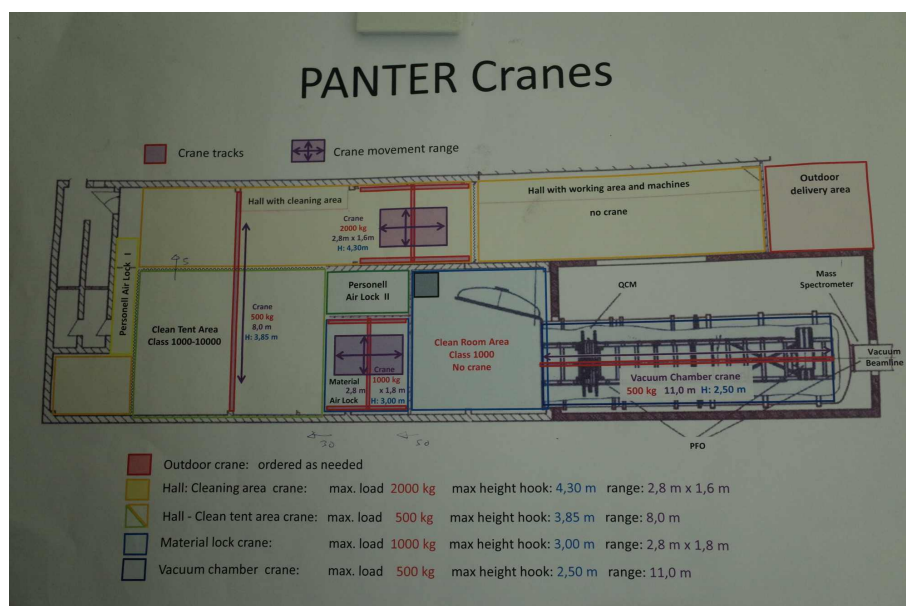
TRoPIC je back-illuminated pnCCD senzor o velikosti 19,2 x 19,2 cm a velikosti pixelu 75 x 75 μm je prototypem detektoru pro rentgenový dalekohled eROSITA. Senzor je chlazený dusíkem na teplotu -100°C . Senzor měří v energiích od 0,3 keV do 11 keV. Ve velině je nastavení pozice detektoru propojeno s ovládáním senzoru a je tak možné automaticky měřit a sestavovat snímky z většího množství snímků na různých pozicích.

Pixi je CCD senzor o velikosti 26,8 x 26,0 mm se velikostí pixelu 20 x 20 μm dostupný od firmy Princeton Instruments pod označením PI-MTE: 1300B. Rozlišení jednoho snímku je 1340 x 1300 pixelů. Senzor je namontován na peltierově článku, chlazeném vodou. Díky vyšší provozní teplotě v porovnání s TRoPICem, může být použit dřív, než je komora dokonale vyčerpána.

3.3.3 Instalace zařízení

Aby byla udržena čistota prostor, sestává se instalace zařízení z řady postupných kroků. Celý prostor je pro snazší manipulaci vybaven sadou jeřábů. Proces je následující:

- V transportních obalech zabalené zařízení je nejprve dopraveno do Hall with cleaning area kde je z nich vybaleno a zůstává již jen ve folii, do které bylo zabaleno před vypravením z minulých čistých prostor, ve kterých bylo zabaleno.
- Jeřábem je přemístěno do Clean Tent Area, ve které je neustálý přetlak a může být od Hall with cleaning area oddělena sadou závěsů, skrz které je možné projet jeřábem i s nákladem.
- Clean Tent Area slouží pro vybalení zařízení z poslední vrstvy folií, do kterých je zabaleno.
- Na pojízdném stole je převezeno do Material Air Lock, kde je provedena kontrola čistoty a případné dočištění.
- Zařízení pokračuje do Clean Room Area Class 1000, kde je vstup do komory. Tam je přeloženo na jeřáb vedoucí do vakuové komory.
- Ve vakuové komoře je nainstalováno na připravené manipulátory a je odstraněna nosná klec, která je na jeřábu odvezena z komory.



Obrázek 3.8. Plánek místností a jeřábů vstupní komory MPE Panter

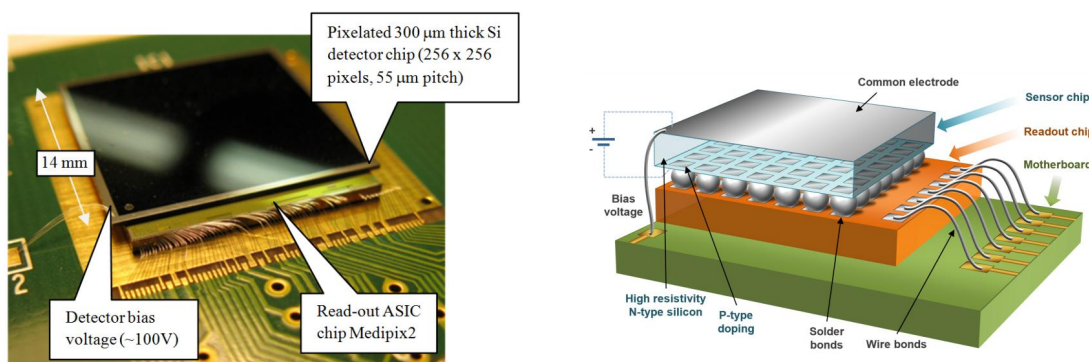
Kapitola 4

Měřicí řetězec

4.1 Timepix

Hybridní pixelový detektor ionizujícího záření Timepix byl vyvinut v mezinárodní kolaboraci zastřešené Evropským centrem jaderného výzkumu CERN ve spolupráci s UTEF ČVUT.

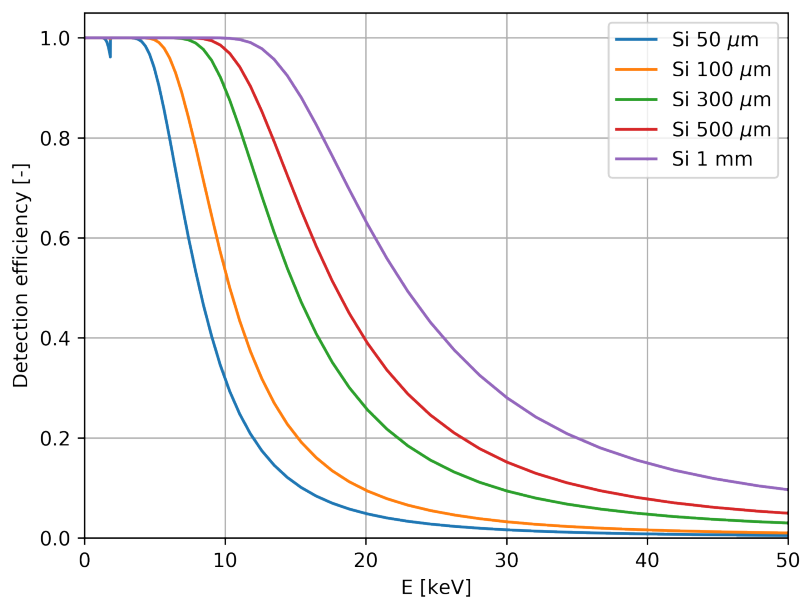
Detektor má rozlišení je 256 x 256 pixelů s velikostí pixelu 55 x 55 μm . Čip detektoru sestává ze dvou vrstev – detekční vrstvy (senzoru) a vyčítacího čipu (ASIC). Čip Timepix3 v tzv. pixelovém režimu umožňuje vyčítání jednotlivých událostí, a to ihned po zásahu pixelu. Tímto způsobem je získávána úplná informace o události – souřadnice pixelu, energie a čas dopadu částice s rozlišením cca 1.6 ns. Místo snímku z čipu přichází kontinuální stream dat po celou akviziční dobu. .



Obrázek 4.1. Timepix osazený na desce a jeho schematické znázornění

Účinnost detektoru závisí na tloušťce a energii dopadajícího záření, jak je znázorněno na grafu 4.2.

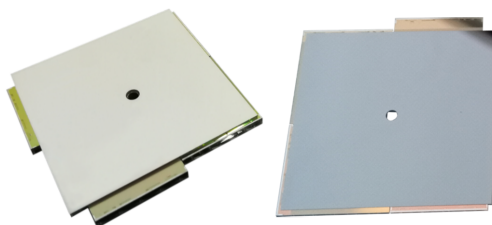
Vzhledem ke své konstrukci se na pixelových detektorech vyskytuje minimální množství šumu, které je nižší než minimální detekovatelná energie fotonu a je tak odstraněno nastaveným tresholdem. Při vyhodnocení není tedy nutné pracovat s tmavým snímkem pro odstranění šumového pozadí tak, jako je tomu u CCD/CMOS čipů. Na detektorech se však mohou vyskytovat takzvané mrtvé pixely, ty je možné na úrovni firmware vymaskovat. Pokud nejsou mrtvé pixely zamaskovány při použití pixelového režimu, generují při měření řádově desítky gigabitů dat, která je z detektoru nutno přenést a následně filtrovat. Celý proces měření je pak značně zpomalen.



Obrázek 4.2. Srovnání spektrální účinnosti pro detektory různých tlouštěk

4.1.1 Timepix QUAD detektor

Detektor se skládá ze čtyř vyčítacích obvodů Timepix3, na kterých je umístěn monolitický polovodičový senzor o rozměru 28 mm x 28 mm v jehož středu je vyvrtán otvor o průměru 2,04 mm. Celkové rozlišení takového senzoru je 512 x 512 pixelů [18]



Obrázek 4.3. Monolytický senzor umístěný na čtyři vyčítací obvody

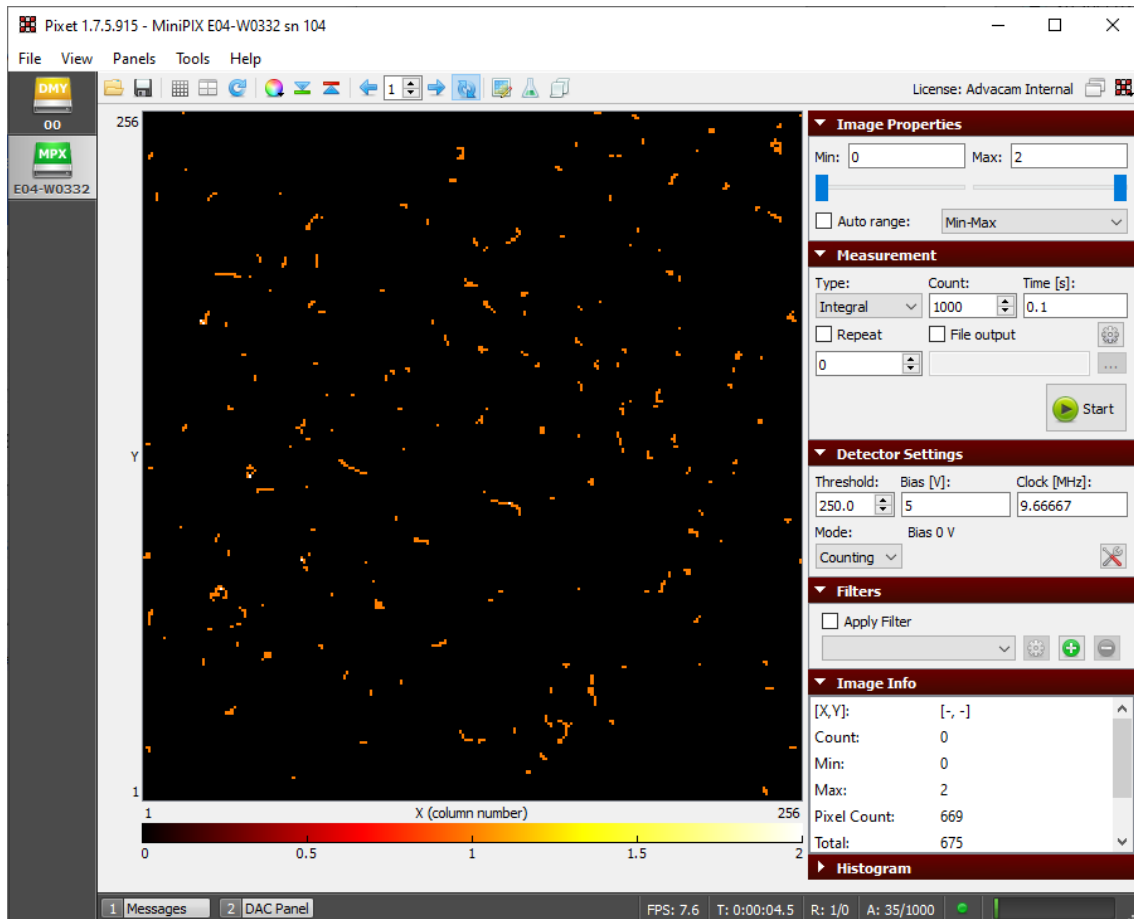
4.1.2 Pixet

PIXET Pro je multiplatformní software vyvinutý společností ADVACAM. Jedná se o software pro ovládání a sběru dat z čipů rodiny Medipix. Podporuje většinu dostupných čipů Medipix (Medipix 2, Medipix3, Timepix, Timepix Quad, Timepix3) Pixet poskytuje nástroje pro nastavení parametrů detektoru, zpracování dat, korekce obrazu a podporu automatizačních scriptů. Pixet má otevřenou architekturu (nikoli open source) podporující různé typy detektorů a souvisejících zařízení (např. řízení polohovacích stolků nebo rentgenových trubíc). Pixet je napsán v jazyce C++ a využívá multiplatformní knihovny Qt. Součástí software je wrapper funkcí pro jazyk Python, ze kterého je možné jádro PIXET ovládat. PIXET je dodáván spolu s detektory a není volně k dispozici. [19]

Vlastnosti software:

- Měří a čte data z detektorů Timepix/Medipix
- Vizualizuje naměřená data

- Konfiguruje detektor
- Ukládá naměřená data v několika formátech (ASCII, obrázek PNG, Pixel Log, ...).
- Kalibrace naměřených dat
- Nástroj pro clusterování
- Multiplatformní software (Windows, Mac OS X, Linux)



Obrázek 4.4. Ukázka měření vyzářování $UO_2(NO_3)_2$ Timepixem 2 v prostředí PIXET

4.2 Rentgenový spektrometr Ketek



Obrázek 4.5. Kompletní sestava spektrometru Ketek

Spektrometr je složen z těchto třech částí:

- Předzesilovač (VIAMP-KC), který je pevně spojený se detektorem (VITUS SDD)
- Obslužná elektronika (VICO-AV 2.0)
- Konektorová deska (EVICO-XV-ADAPTER-L)

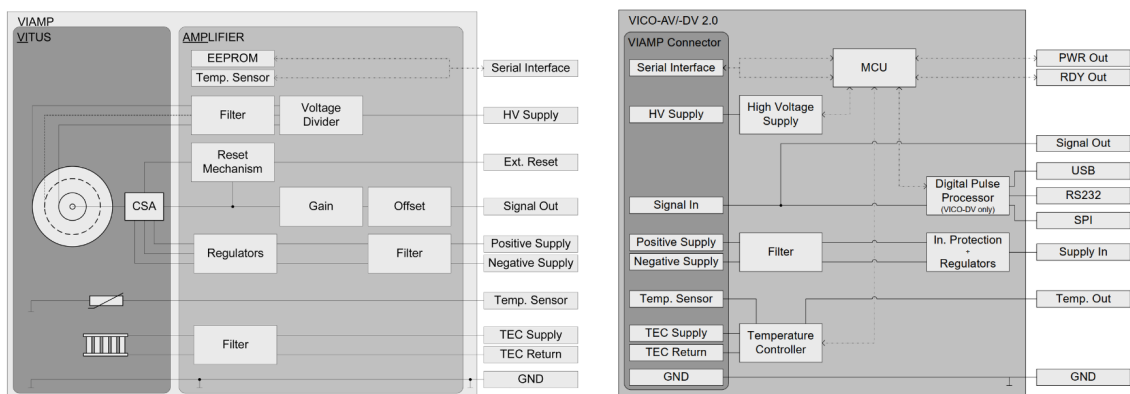
Senzor VITUS SDD se skládá z křemíkového driftového detektoru, který je umístěn na několikastupňový peltierův článěk. Spolu s termistorem je vše uzavřeno ve vakuové kapsli. Ta slouží jako pouzdro senzoru, a je zcela nezbytná, jelikož se detektor chladí až na -35°C , což je teplota hluboko pod rosným bodem běžných podmínek a při kontaktu se vzduchem by na něm okamžitě začala kondenzace vzdušné vlhkosti, která by detektor zkratovala a poškodila. Senzor VITUS SDD je ověřený řadou kosmických misí a je součástí roveru Curiosity na povrchu Marsu.

Senzor je zasunut do patice, která je se zesilovačem na společném Rigid Flex PCB¹. Senzor a zesilovač jsou dodávány v nerozebíratelném společném pouzdře pod názvem VIAMP. V případě specifických potřeb je možné nechat firmou Ketek rozebrat pouzdro speciálními nástroji. VIAMP je připojen COTS 10pinovým FFC kabelem k elektronice VICO-AV. Ta obsahuje napájecí zdroje, kontroler teploty senzoru a především procesor zpracování signálu ze senzoru.

Pro ovládání spektrometru je možné využít integrované uživatelské prostředí ProSpect, nebo knihovnu `handel.dll` obsluhující elektroniku a `xia_usb2.dll` umožňující komunikaci prostřednictvím USB.

Vybrané parametry:

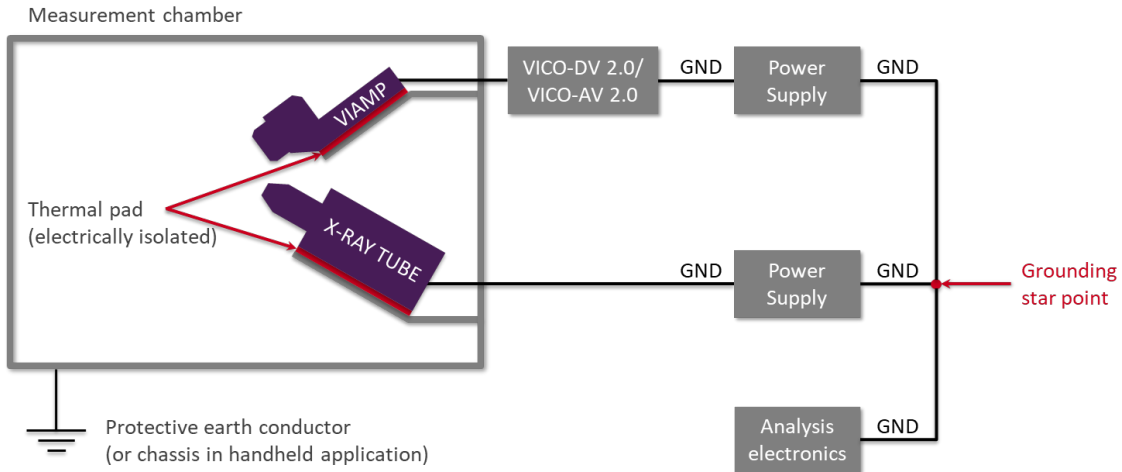
Rozsah měřených energií	0,2 – 20 keV
Rozhraní	USB 2.0, SPI, RS232
Napájecí napětí	5–12 V
Příkon	2,5 W

**Obrázek 4.6.** Blokový diagram spektrometru Ketek

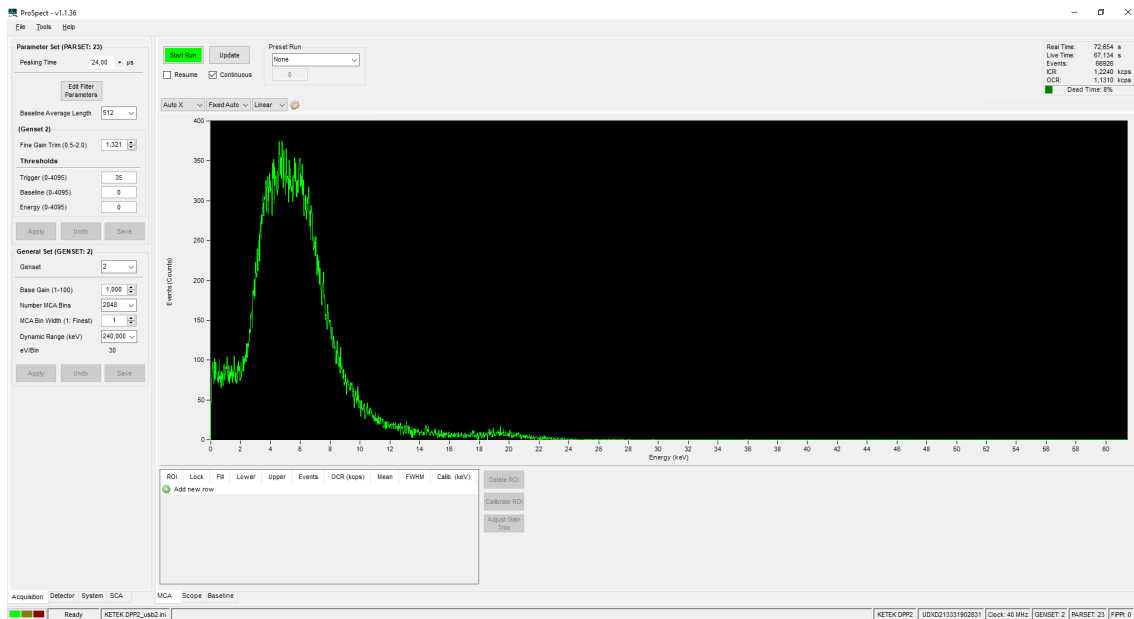
Vzhledem k citlivosti senzoru je velmi důležité zachovat výrobcem doporučené hvězdicové zemnicí schéma, kdy předzesilovač s detektorem nejsou spojeny se zemí, jak je

¹ Rigid Flex PCB je technologie kombinující desky s pevným jádrem a pružné spoje, které jsou během výroby slaminovány jako nedělitelný celek. Není tak nutné používat kabely a konektory.

znázorněno na schématu 4.7. Dále je nutné, aby byl záporný pól napájecího zdroj přizemněn. Neuzemněné spínané zdroje mohou mít mezi V- a GND i vysoké desítky voltů. Pokud je spektrometr špatně zemněn, nebo napájen, je měření prakticky znemožněno šumem.



Obrázek 4.7. Vzájemné propojení zemí spektrometru Ketek



Obrázek 4.8. Šum v měření spektrometrem, při nedodržení doporučeného zemnění

4.3 Rentgenový spektrometr SXD

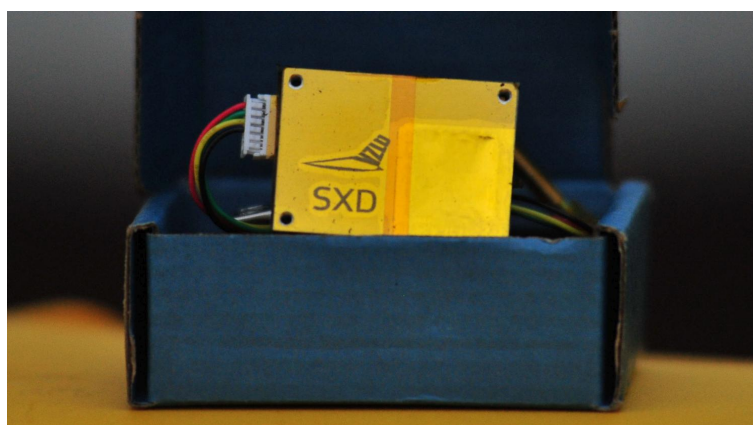
Space X-Ray Dosimeter (SXD) je digitální křemíkový senzor ionizujícího záření se čtvercovým detektorem o ploše 100 mm². Pro rentgenové fotony do 100 keV pracuje SXD jako spektrometr. Pro gama záření se spektrální účinnost ztrácí a SXD pracuje pouze jako dozimetr. SXD byl navržen jako malé zařízení s objemem 10,5 cm³, hmotností 25 gramů a nízkou spotřebou 300 mW. Detektor má rychlou odezvu do 50 ms a je schopen měřit až 100 000 událostí za sekundu.

Komunikace s SXD může probíhat prostřednictvím sběrnice I2C, nebo UART.

Vybrané parametry:

Vlastnost	Hodnota
Hmotnost	25 g
Velikost	35 x 25 x 12 mm
Rozsah měřených energií	15 - 800 keV
Spektrální účinnost	30% @ 20keV, 3% @ 60keV
Rozlišení	195 eV, 4096 binů
Velikost detektoru	100 mm ²
Komunikační rozhraní	I2C, UART
Napájecí napětí	2,8V to 5V
Příkon	300 mW

Senzor je použit na satelitech VZLUSAT-1 a VZLUSAT-2.



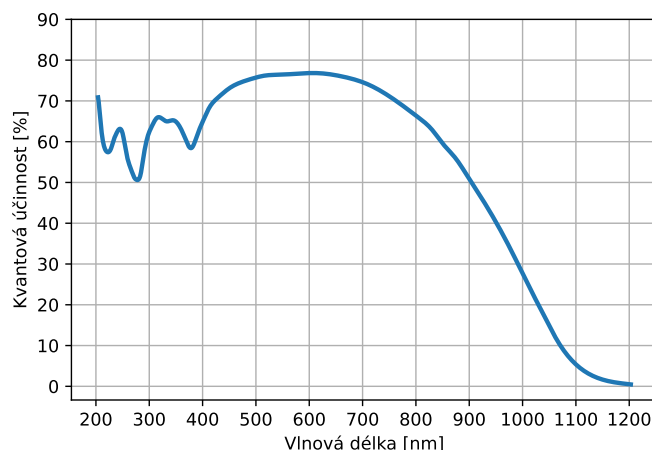
Obrázek 4.9. Rentgenový spektrometr SXD

4.4 Řádková kamera Hamamatsu

Kamera je osazena monochromatickým CCD senzorem určeným pro měřicí aplikace, především spektrometry. Vyznačuje se vysokou citlivostí, nízkým šumem a rovnou spektrální citlivostí. Citlivost CCD by dle zkušeností některých zahraničních pracovišť měla sahát až do měkké rentgenové oblasti, měření spektrální odezvy v dokumentaci však končí na 200 nm a dále nepokračuje, viz graf 4.10.

Vybrané parametry:

Rozlišení	2064 x 22 pixelů
Velikost pixelu	14 x 14 μm
Krycí sklo čipu	Odnímatelné, křemičité
Model CCD	S10420-1104-01
Chlazení	Není součástí
Příkon	12 mW

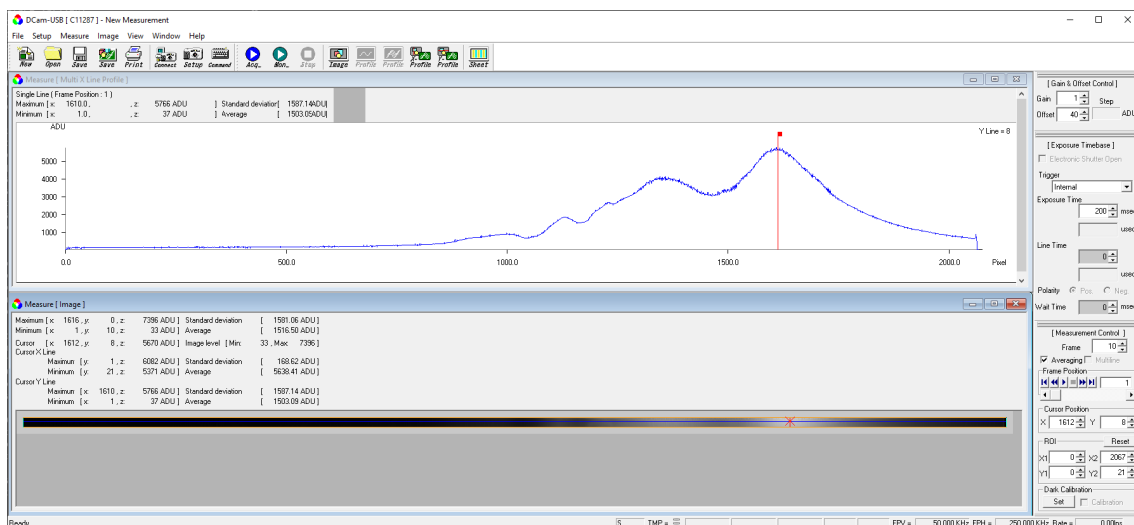


Obrázek 4.10. Spektrální odezva senzoru Hamamatsu S10420-1104-01 [20]

Senzor je zapojen do driveru C11287 dodávaným též firmou Hamamatsu. Driver obsahuje 14bitový A/D převodník pro konverzi signálu z CCD, obvody pro ovládání CCD, časovač a obvody napájení senzoru.

Driver je možné připojit k počítači prostřednictvím rozhraní USB 2 (k dispozici je USB A Female konektor). Driver též obsahuje dva BNC konektory. Jeden slouží pro připojení externí závěrky, druhý signalizuje probíhající expozici. [21]

Z počítače je možné driver obsluhovat prostřednictvím dodaného software DCam-USB, nebo prostřednictvím knihovny DCamUSB.dll



Obrázek 4.11. Ukázka měření pomocí software DCam-USB dodávaným společně se senzorem Hamamatsu

4.5 Posuvné stolky

Při provádění testů je zapotřebí manipulovat snímači i optikami a to jak lineárně, tak úhlově. Z důvodu univerzality, preciznosti a spolehlivosti byly zvoleny posuvné stolky firmy Standa. Ta dodává několik desítek typů stolků, včetně jejich vakuových variant. Všechny varianty stolků je možné připojit ke stejným budičům a ovládat prostřednictvím stejného software.

Potenciálním problémem je absence encoderů, s pomocí kterých by bylo možné detekovat a kompenzovat případné výpadky kroku motoru – tedy situaci, kdy je poslán impulz do motoru, ten však nevykoná požadovaný pohyb. Obvykle z důvodu překročení maximálního zatížení. Enkodery je možné doplnit, avšak jen na některé modely, které nejsou určeny do vakua.

4.6 PICO - KBU4

Na základě aktuálního požadavku zadavatele, bylo v průběhu řešení diplomové práce změněno zadání s ohledem na měření ve vakuovém tunelu Panter v Německu. S ohledem na kompatibilitu ovládání a požadavky německého partnera, byla celá sestava implementována jako modulární software spustitelný na platformě PC (notebooky).

Kapitola 5

Ovládací software xdMeasure

Všechny prvky měřicího řetězce je možné ovládat z jednotného prostředí včetně automatizace prováděných měření a základního vyhodnocení naměřených dat.

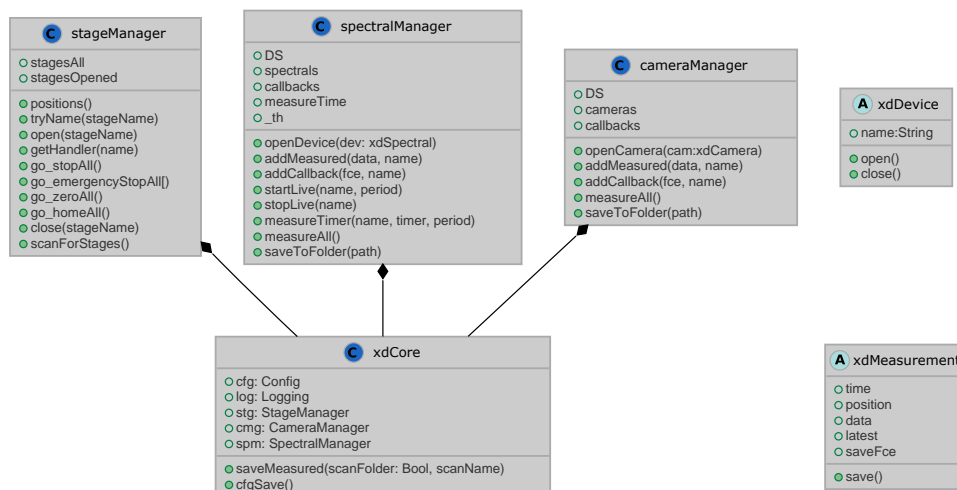
Hlavními požadavky jsou:

- Systém musí být jednoduše rozšiřitelný o další modely senzorů i aktuátorů, z toho důvodu je celý projekt založený na objektovém přístupu.
- Aby bylo možné ovládat zařízení jak z GUI tak jednoúčelovými skripty, musí být jádro programu striktně odděleno od uživatelského rozhraní.
- Měření jsou často těžko opakovatelná, je proto důležité ukládat vždy maximum dostupných dat.

Software xdMeasure je vyvíjen jako open-source pod licencí LGPLv3 a je dostupný v repozitáři https://gitlab.com/matescb/xd_Measure.

5.1 Jádro xdMeasure

Jádrem celého systému je třída `xdCore`, která iniciuje základní komponenty systému a může být zavolána z GUI, či jednoúčelového skriptu.



Obrázek 5.1. Schéma jádra xdMeasure

V prvním kroku je načten soubor `config.ini`, který obsahuje informace o nastavení systému, editací `config.ini` je možné měnit parametry systému, bez nutnosti zásahu do zdrojového kódu. Následně je spuštěna a konfigurována knihovna zabezpečující logování událostí napříč systémem.

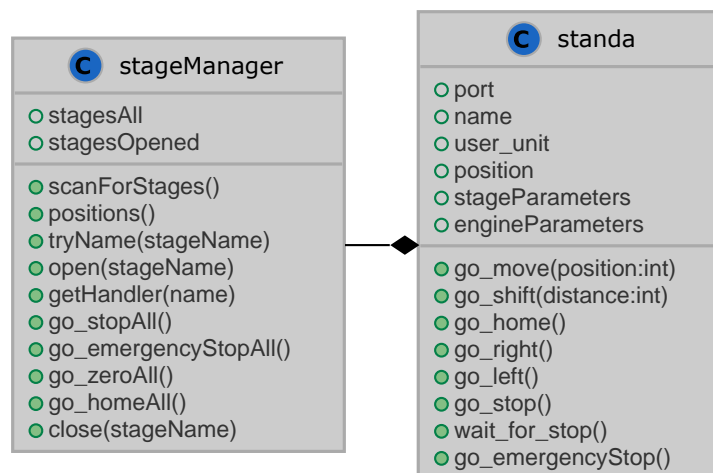
Jádro systému sestává ze třech klíčových komponent: `stageManager`, `spectralManager` a `cameraManager`. Každá komponenta se stará o množinu připojených zařízení specifického typu: posuvné stolky, spektrometry, CCD/pixelové

detektory. Managery tato zařízení iniciují a následně k nim zprostředkují jednotný přístup napříč celým systémem. Všechny tři managery jsou inicializovány po spuštění `xdCore`.

Všechna připojená zařízení kromě posuvných stolků dědí základní funkce z abstraktní třídy `xdDevice`, ta obsahuje funkce `open()` a `close()` a především proměnou `name`, která obsahuje název zařízení ve formě textového řetězce. Pod tím je následně zařízení dostupné v `spectralManager`, nebo `cameraManager`.

Managery uchovávají poslední naměřená data ze všech zařízení. Data jsou uchovávána v třídě `xdMeasurement`, která krom naměřených dat obsahuje informace o čase měření, pozici všech stolků a nastavených parametrech měření. Dále `xdMeasurement` obsahuje odkaz na ukládací funkci specifickou každému `xdDevice` a ukládací funkce společné pro všechna naměřená data, které vyprodukují formáty pickle JSON a FITS. Pickle JSON ukládá kompletní bitovou kopii objektu `xdMeasurement`. FITS (Flexible Image Transport System) je otevřený formát pro ukládání astronomických dat používaný jak MPE Panter, tak řadou observatoří (Chandra, XMM–Newton, Hubble, ...). Formát v sobě sdružuje naměřená data a hlavičku se všemi dostupnými metadaty. Výhodou je možnost otevření takto naměřených dat v celé řadě nástrojů určených pro astronomy, například v Maxim DL a AvisFv.

5.2 Posuvné stolky



Obrázek 5.2. Schéma správce posuvných stolků

Správu posuvných i rotačních stolků má na starosti třída `stageManager`, ta po svém spuštění proskenuje všechny dostupné COM porty (funkce `scanForStages`), zda se na nich nevyskytují Standa drivery. Následně příslušné porty otevře, přečte pojmenování stolku a porty opět uzavře. Skenování je možné provádět opakovaně a identifikovat tak i stolky, které byly připojeny až po spuštění programu. Jména a porty všech dostupných stolků jsou umístěny ve slovníku `stagesAll`, ten obsahuje vždy dvojici jména a portu. Pro přidání stolku stačí zavolat funkci `open(stageName:String)`, kde `stageName` je jméno stolku. Ten je následně inicializován a přidán do `stageManageru`.

Každý stolek je obsluhován jednou instancí třídy `standa`, ta s driverem stolku komunikuje prostřednictvím výrobce dodané knihovny `libximc` a python wrapperu `pyximc`. Instance obsahuje název stolku (`name`), použitý COM port (`port`) a parametry stolku ve dvou strukturách:

- `stageParameters:stage_settings_t(Structure)`, která obsahuje především informace o stoupání kuličkového šroubu, rozsahu pohybu stolku a použitých jednotkách (milimetry, nebo úhlové stupně)
- `engineParameters:engine_settings_t(Structure)`, která obsahuje informace o parametrech motoru jako jsou počet kroků na otočku, nastavený počet mikrokroků a další.

Ty mohou být použity pro přepočítání pozice mezi milimetry a počtem kroků a identifikaci, zda se jedná o lineární, či posuvný stolek. Obsah těchto struktur a název stolku `name` jsou vyčteny z paměťového čipu, který je umístěn v propojovacím kabelu mezi budičem a stolcem. Výhodou je, že při zapojování nevádí prohození budičů.

Informace o aktuální pozici je uložena v parametru `position`, pozici je možno změnit jednoduše zapsáním nové pozice do proměnné `position`. Tedy například:

- Stolek je na pozici 100 mm (`position => 100`)
- Pozice je změněna na 20 mm (`position=20`)
- Stolek je posunut o 14 mm (`go_right(14)`)
- Stolek je na pozici 34 mm (`position => 34`)

Veškeré přepočty a komunikace s driverem proběhnou automaticky.

Funkcí `getHandler` je možné na základě jména stolku získat handler jeho objektu a ovládat jej. Ke každému stolku může napříč programem existovat libovolné množství handlerů.

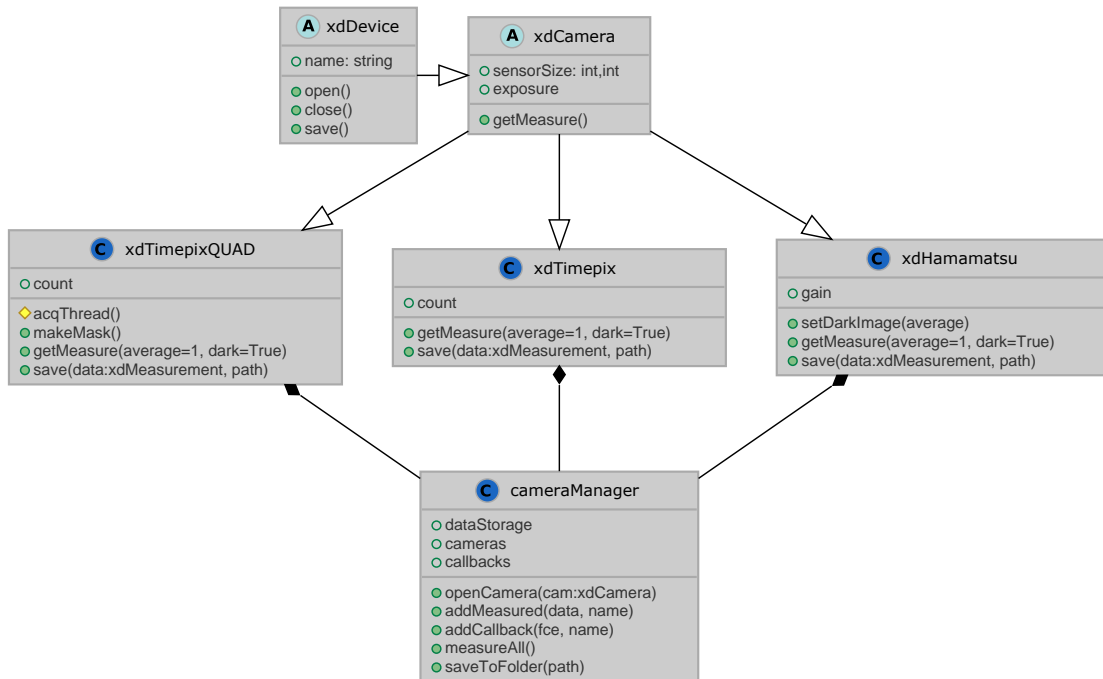
Pro ovládání stolku slouží následující funkce:

Funkce	Popis
<code>go.move</code>	Najetí stolku na zadanou pozici v mm/deg
<code>go.shift</code>	Posun stolku o zadaný počet jednotek v mm/deg
<code>go.zero</code>	Stolek dojde do nulové polohy
<code>go.home</code>	Stolek dojde na konec rozsahu, kde je zastaven koncovým spínačem
<code>go.right</code>	Stolek jede v kladném směru, dokud není zastaven
<code>go.left</code>	Stolek jede v záporném směru, dokud není zastaven
<code>go.stop</code>	Stolek postupně zastaví, dle nastavené deakcelerační rychlosti
<code>go.emergencyStop</code>	Stolek okamžitě zastaví ¹
<code>wait.for.stop</code>	Blokující čekání na zastavení stolku

Díky jednotné správě stolků, je možné jejich hromadné ovládání prostřednictvím funkcí `stageManager`, konkrétně `go_allHome`, `go_stopAll`, `go_emergencyStopAll` a `go_zeroAll`. Ty volají příslušné funkce všech iniciovaných stolků. Důležité jsou především funkce pro zastavení všeho, co je aktuálně v pohybu.

Nastavení parametrů stolku jako jsou jeho jméno, rychlost pohybu/akcelerace/deakcelerace, použité jednotky a další, není možné dělat prostřednictvím `xdControl` a musí být použit výrobcem dodaný software `XILab`.

5.3 CCD a pixelové detektory



Obrázek 5.3. Schéma správce CCD a pixelových detektorů

Všechny CCD a pixelové detektory jsou odvozeny od abstraktní třídy `xdCamera`, ze které dědí povinnou proměnnou `sensorSize` obsahující velikost senzoru a `exposure` s nastavením expozice. Hlavní je pak funkce `getMeasure()`, která po provedení měření zavolá funkci `addMeasured(xdMeasurement, name)` třídy `cameraManager`, jejímiž parametry jsou naměřená data zabalená ve třídě `xdMeasurement` a název zařízení zadaný při inicializaci. Naměřená data jsou tedy dostupná pouze skrz `cameraManager`.

Správce `cameraManager` inicializován při startu pod názvem `cmg` a kdekoli v systému může být importován příkazem `from xdCore import cmg`. Pouze skrze něj je možné přistupovat k naměřeným datům. Je proto nezbytné, aby bylo každé zařízení založené na třídě `xdCamera` a při inicializaci předáno do správce. K tomu slouží funkce `cmg.openCamera(xdCamera)`, jejímž jediným argumentem je iniciované zařízení.

K naměřeným datům je možné přistupovat pomocí `cmg.dataStorage[name]`, kde `name` je při inicializaci zadané jméno zařízení.

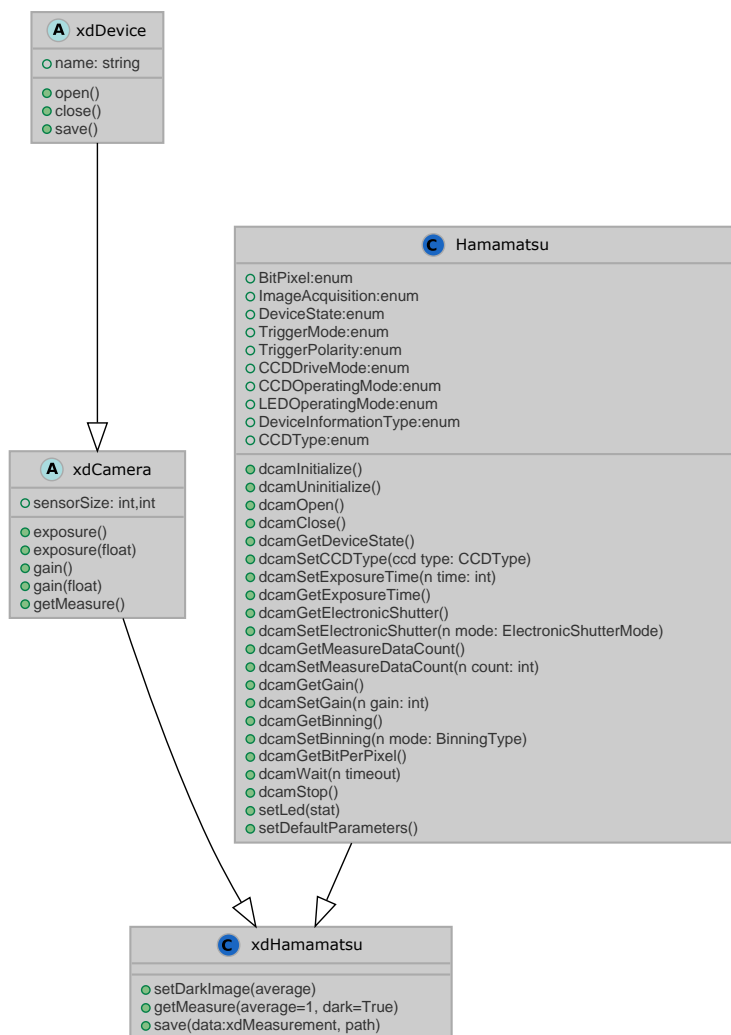
Hlavním přínosem tohoto relativně komplikovaného přístupu jsou dvě funkcionality. První je možnost funkcí `cmg.measureAll()` spustit měření všemi zařízeními. Druhou možnost používat callbackové funkce, ty jsou zavolány pokaždé, když jsou zvoleným zařízením naměřena nová data. Callbacky je možné k zařízením přiřazovat pomocí `addCallback(fce, name)`.

5.4 Řádková kamera Hamamatsu

Pro obsluhu řádkové kamery slouží třída `xdHamamatsu`, která je založena na `sdCamera`. Samotné ovládání kamery je prováděno prostřednictvím výrobce dodané knihovny `DCamUSB.dll`, jejíž funkce jsou z Pythonu zpřístupněny třídou `Hamamatsu`.

U kamery je možné nastavit délku expozice od 400 μs do 16 s (`xdHamamatsu.exposure`) a zesílení od 1 do 10 násobku (`xdHamamatsu.gain`). Zavoláním funkce `xdHamamatsu.setDarkImage()` se provede deset odměřů a jejich průměr se použije jako temný snímek, který je následně odečten od každého měření, až do vypnutí `xdMeasure`, nebo naměření nového temného snímku.

Funkce `xdHamamatsu.getMeasure()` je rozšířena o dva volitelné parametry. Jedním je `avarage`, který provede zadaný počet odměřů a uloží jejich průměr a druhým je `dark`, který umožňuje vypnout automatické odečítání temného snímku pro aktuální měření.



Obrázek 5.4. Třídy obsluhy Hamamatsu CCD

5.5 Timepix a QUAD

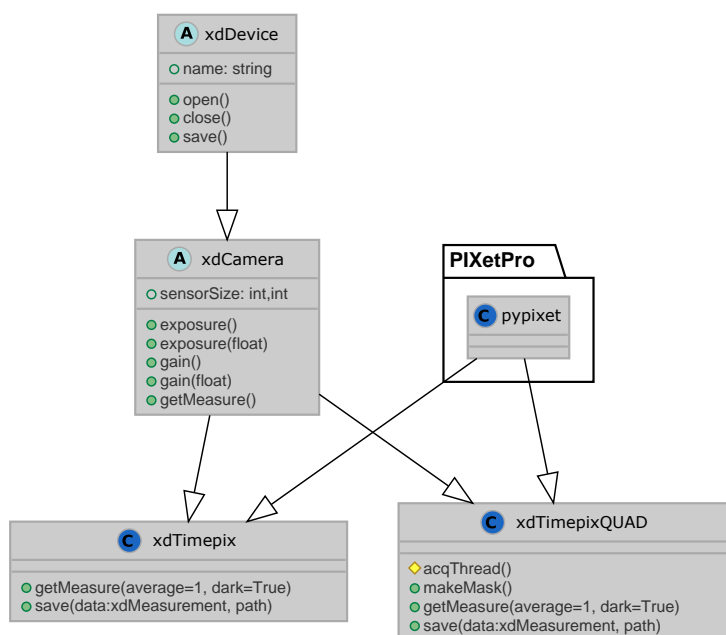
Komunikace se senzory probíhá skrz jádro PIXetu, které je importováno třídou `xdTimepix` a `xdTimepixQuad`. Vzhledem k licenci není PIXet distribuován současně s `xdMeasure` a musí být dodatečně nahrán do složky `xdMeasure\timepix\PIXetPro`. Systém je testován s PIXetem ve verzi 1.7.5.915.

Pro použití čipů Timepix je nezbytné mít k dispozici příslušné konfigurační soubory obsahující kalibrace čipu a další údaje. Konfigurace je pro každý čip unikátní a soubor

je dodán společně se senzorem. Každý čip je vybaven kódem, podle kterého je možné přiřadit správnou konfiguraci.

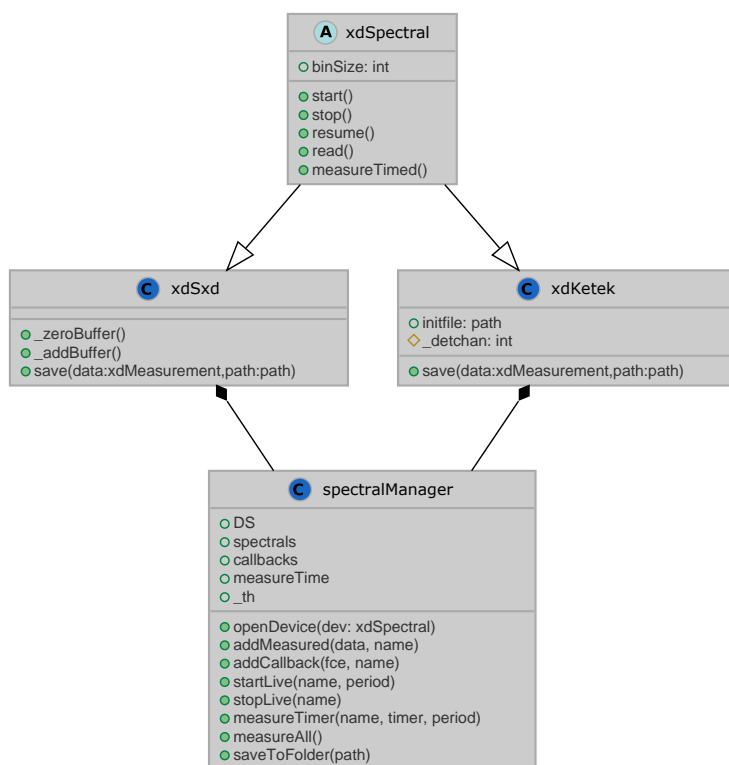
Třída Timepixu `xdTimepix` implementuje povinné funkce `xdCamera` za použití PIXetu. Každý snímek je PIXetem uložen do dočasné složky `xdMeasure/tmp` ve formátu `txt` a metadata ve formátu `dsc`, cesta k těmto souborům je součástí `xdMeasurement`. Při zavolání funkce `save` jsou vytvořeny soubory `png` a `csv` ve složce s měřením a zároveň jsou do ní překopírovány soubory vygenerované PIXetem. Důvodem této redundance je možnost korekce, pokud by byla po provedeném měření objevena chyba v manipulaci s daty na straně `xdMeasure`.

Třída `xdTimepixQuad` je podobná `xdTimepix`, jen je rozšířena o schopnost vyčítat souběžně ze všech čipů QUADu najednou pomocí vláken. Naměřená data ze všech čipů jsou pak automaticky spojena do jednoho snímku, ve kterém jsou následně vymaskovány všechny mrtvé pixely podle předdefinované masky. Masky je uložena v `xdMeasure\timepix\config\Quad1\filter.csv`.



Obrázek 5.5. Třídy obsluhy detektorů Timepix a QUAD

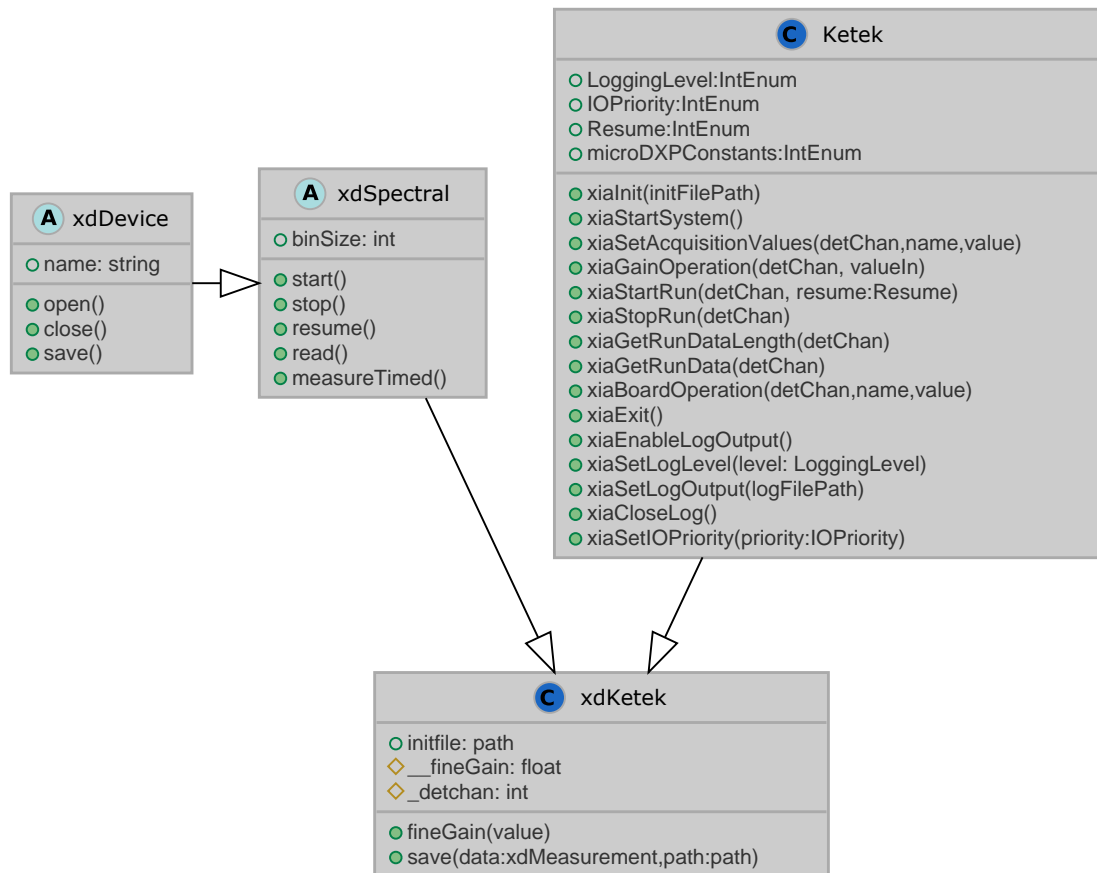
5.6 Spektrometry



Obrázek 5.6. Schéma správce spektrometrů

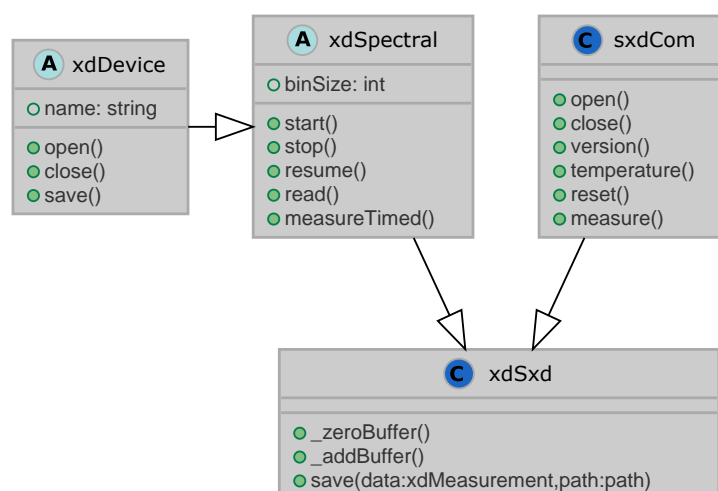
Spektrometry jsou spravovány třídou `spectralManager`, inicializace zařízení a ukládání dat a callbacky fungují stejně jako u `cameraManager`.

5.6.1 Ketek



Obrázek 5.7. Třídy obsluhy Keteku

5.6.2 SXD



Obrázek 5.8. Třídy obsluhy SXD

Spektrometr SXD je připojen prostřednictvím COM portu a komunikace probíhá prostřednictvím jednoduchého ASCII protokolu typu dotaz-odpověď.

Každý příkaz je zakončen koncem řádku typu CR + LF, odpověď vždy začíná písmenem R: a pokračuje písmenem příkazu, na který je odpovídáno. Spektrum je uloženo do 512 binů, do kterých je od zapnutí neustále načítáno. Při vyčtení naměřených dat příkazem M, nebo C jsou všechny biny vynulovány.

Příkaz	Popis
I	Verze firmware
T	Teplota
Q	Reset
M	Naměřené spektrum v binární podobě
C	Naměřené spektrum v komprimované podobě

Tabulka 5.1. Příkazy pro ovládání spektrometru SXD

Při měření spektra je často velké množství binů nulových. Na tom je založena komprimovaná forma odpovědi, ve které jsou dlouhé fragmenty nul nahrazeny jen informací o jejich počtu.

Celá komunikace je implementována ve třídě `sxdCOM`, ta je následně poděděna třídou `xdSXD`, která je založena na abstraktní třídě `xdSpectral` a umožňuje tak unifikovaný přístup k SXD jakožto ke standardnímu spektrometru v systému.

5.7 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní je vytvořeno za použití pyQt6 knihoven a Qt Designeru. Každý typ zařízení jako jsou `xdStanda`, `xdSpectral`, nebo `xdCamera` má vytvořený svůj grafický modul, který nemusí být přizpůsobován konkrétnímu zařízení. Díky tomu `xdSXD` i `xdKetek` využívají grafický modul `xdSpectralWidget` a `xdCameraWidget` je využíván `xdHamamatsu`, `xdTimepix` i `xdTimepix`. Toto je výhodné pro jakákoli další rozšíření.

Pro zobrazení naměřených dat v reálném čase je využita knihovna `pyQtGraph`¹, která umožňuje provádět nad měřenými daty základní analýzu.

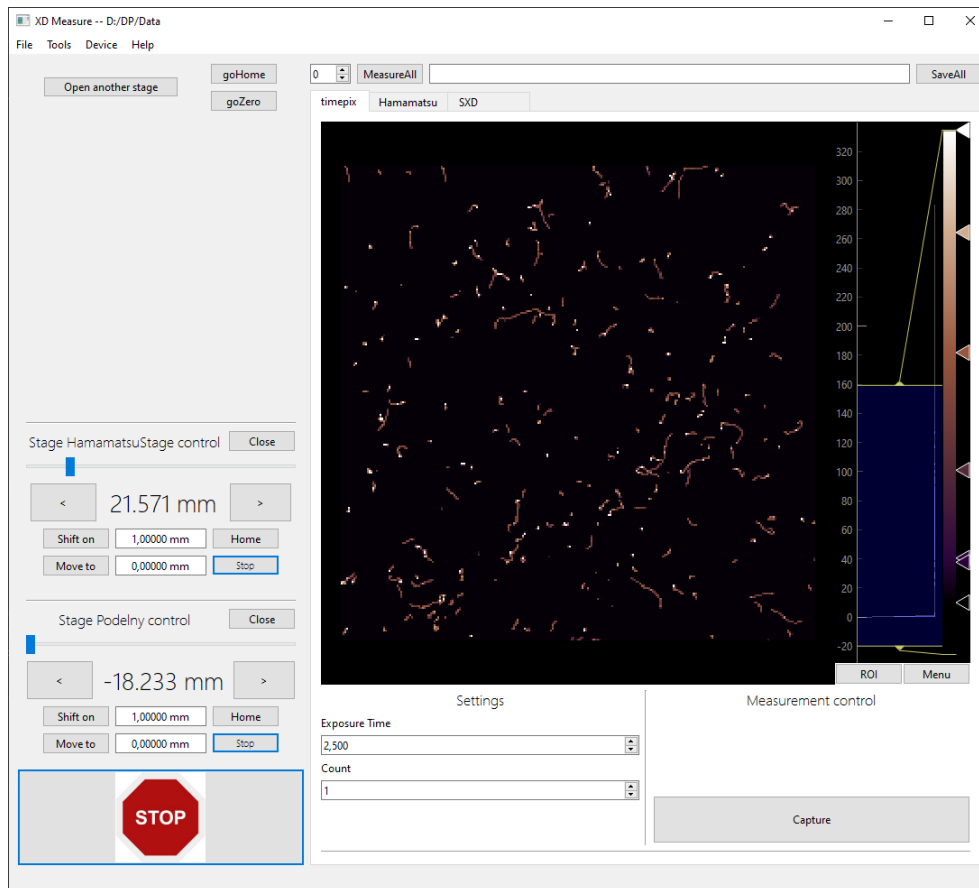
5.7.1 Ovládání

Rozhraní se skládá z jednoho hlavního okna, obsahujícího sloupec s ovládáním motorů a záložky pro jednotlivé přístroje.

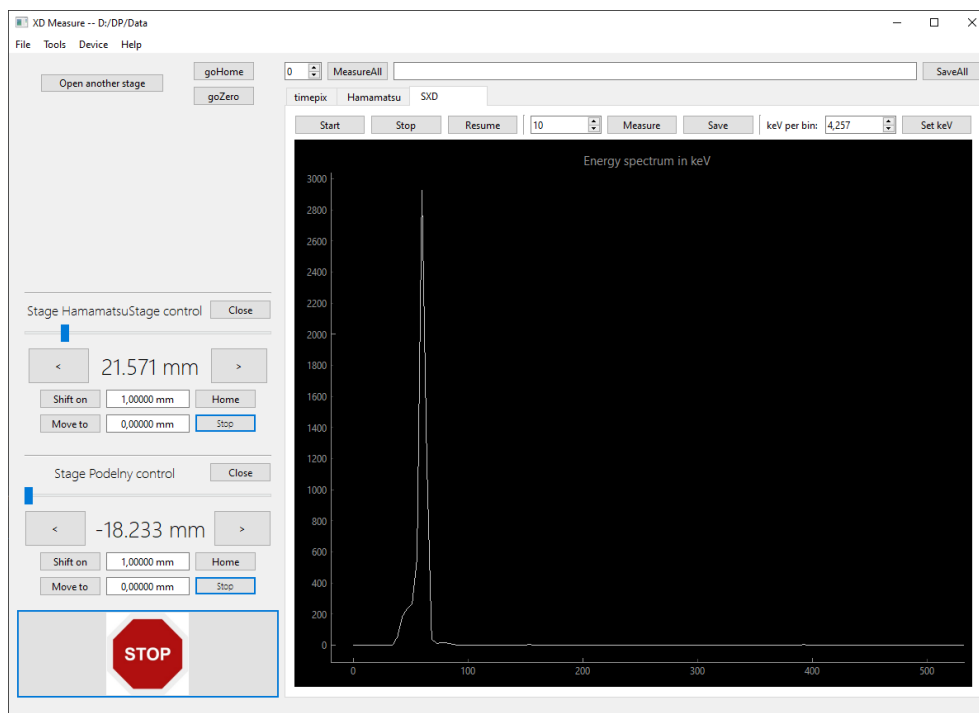
V levé části okna je sloupec, do kterého je možno přidávat ovládání posuvných a rotačních stolku pomocí tlačítka `Open another stage`. Jednotlivé motory je možné ovládat popsány tlačítky. Tlačítka `<` a `>` posouvají stolkem tak dlouho, dokud jsou stisknuta. Pro případ jakéhokoli problému je k dispozici velké tlačítko `STOP` které okamžitě zastaví všechny připojené motory a to i pokud jsou ovládány automatizačním nástrojem.

Tlačítkem

¹ <https://www.pyqtgraph.org>



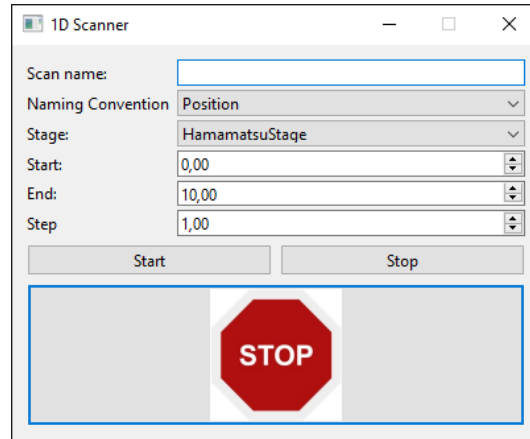
Obrázek 5.9. Ovládání Timepixu v programu xdMeasure



Obrázek 5.10. Ovládání SXD rentgenového spektrometru v programu xdMeasure

5.7.2 Nástroje

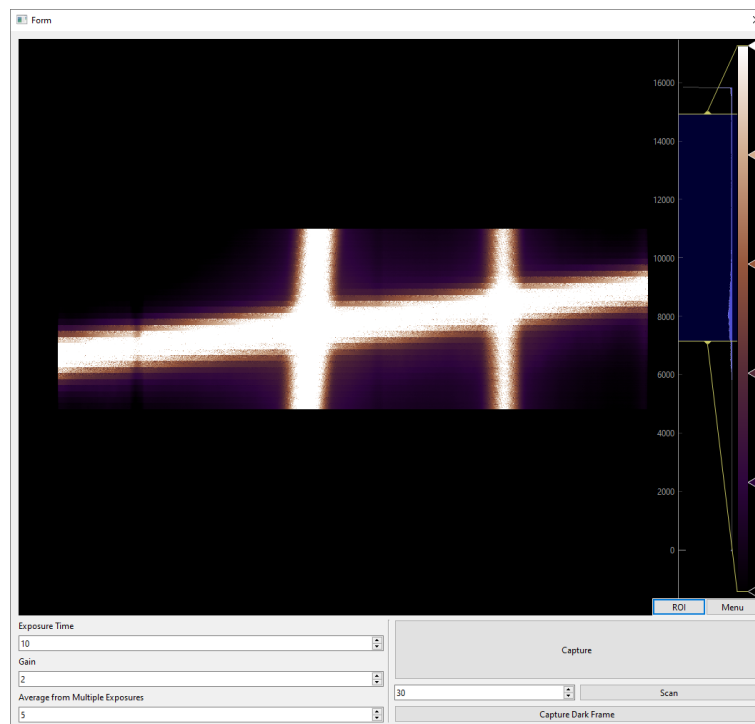
Univerzální 1D skener



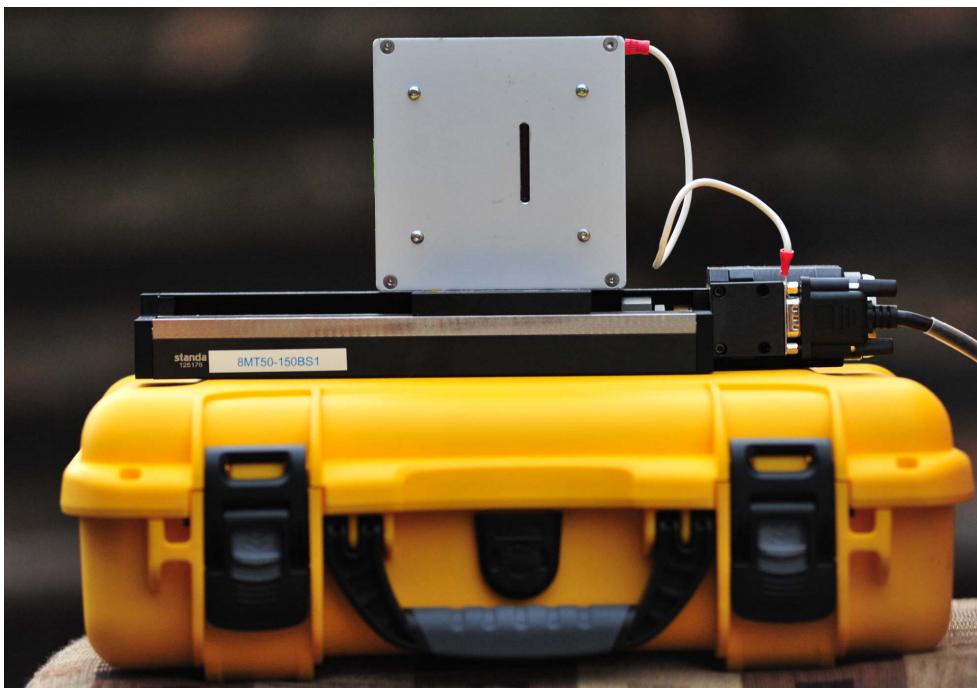
Obrázek 5.11. Ovládací panel 1D skeneru

Hamamatsu skener

Po připojení řádkové kamery na lineárním posuvu umožňuje tento nástroj automatické naskenování zadaného rozsahu. Snímky jsou automaticky skládány do výsledného obrazu, který je v průběhu měření zobrazován. Pokud je uživatelem před začátkem skenování načten temný snímek, pak je tento snímek automaticky odečten od každého odměru před sestavením výsledného obrazu.



Obrázek 5.12. Ovládací panel Hamamatsu skeneru



Obrázek 5.13. Hamamatsu skener na transportním kufříku

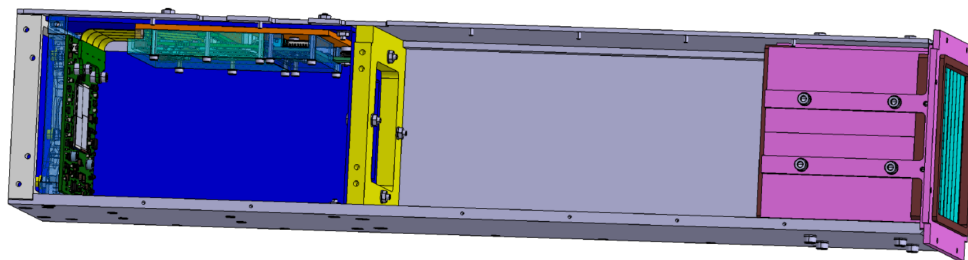
Kapitola 6

Testované experimentální zařízení

Měřicí řetězec byl využit při dílčích měřeních následujících experimentů.

6.1 Demonstrátor rentgenového dalekohledu

Demonstrátor rentgenového dalekohledu je malý satelit-cubesat velikosti 4U obsahující především širokoúhlou 2D optiku typu račí oko, v jejíž ohniskové rovině je umístěný Timepix QAUD senzor v jehož středovém otvoru je spektrometr Ketek.



Obrázek 6.1. Demonstrátor rentgenového dalekohledu [8]

6.2 KB-6500

Jedná se o multifoliovou optiku vycházející z konstrukce Kirkpatrick–Baez, kde jsou parabolická zrcadla aproximována množinou rovinných zrcadel umístěných na tečny paraboly. Celý systém se skládá ze dvou na sebe kolmých modulů. Každý modul se skládá ze dvou 1D optik se společným ohniskem. Ohnisko celého systému je navrženo na 6500 mm od čela prvního modulu.

6.3 Sjednocený demonstrátor pro Panter

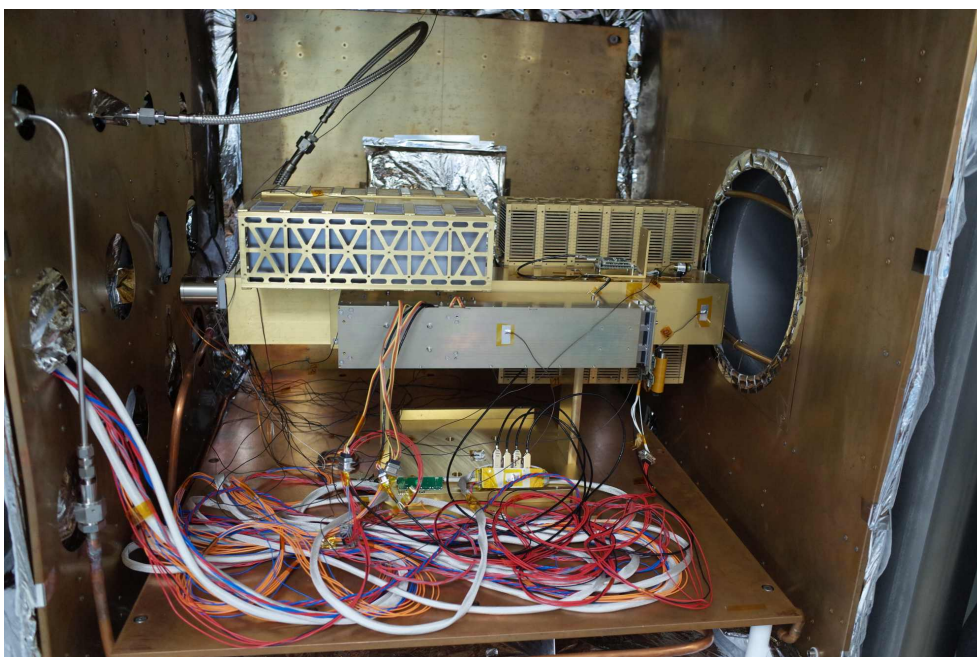
Pro účely měření v rentgenovém tunelu Panter byly demonstrátor a KB-6500 umístěny na společnou konstrukci, spolu s referenčními senzory Timepix QUAD a Ketek. Jeden z modulů KB-6500 byl umístěna na lineární posuv Standa tak, aby byla nastavitelná vzdálenost mezi jednotlivými moduly optiky na 12-212 mm.

Pro účely převozu a montáže demonstrátoru byla vyrobena transportní klec, umožňující uchycení na jeřáb.

Software xdMeasure umožnil ovládat souběžně všechny tyto senzory z jednotého uživatelského rozhraní. Měření všemi senzory bylo možné hromadně spouštět a ukládat.

6.3.1 Vypékání

Před převozem do MPE Panter bylo provedeno vypěčení v termovakuové komoře, které zkrátilo následný outgassing a bylo požadavkem pro přijetí do zařízení. Pro účely tohoto vypěčení byl sjednocený demonstrátor osazen 16 termočlánky a následně byl ve vakuu vypékán při teplotě 80°C po dobu 100 hodin, kde čas je počítán od chvíle, kdy celý demonstrátor dosáhl požadované teploty. Po vypěčení a otevření komory bylo zařízení co nejrychleji zataveno do fólie, aby se zabránilo jeho opětovné kontaminaci. Místnost s vakuovou komorou v MPE Partner má čistotu úrovně ISO 4, což je o 3 řády vyšší čistota, než je v místnosti s komorou ve VZLU. Aby byla úroveň ISO 4 udržena, jsou nároky na čistotu vstupujících experimentů vysoké a striktní.



Obrázek 6.2. Vypékání sdruženého demonstrátoru v termovakuové komoře ve VZLU Praha

Kapitola 7

Měření

V průběhu řešení této práce proběhla řada experimentů, jejichž cílem byla charakterizace dvou typů rentgenové optiky. Obě optiky vznikly v rámci projektu ESA SR-CTP. První je optika KB-6500 určená pro demonstraci multifoliové konstrukce optiky typu Kirkpatrick-Baez. Druhým typem bylo račí oko, které je součástí rentgenového teleskopu pro cubesat. Optika je integrována do tzv. demonstrátoru společně s detektory Timepix3 Quad a spektrometrem Ketek a je primárním výsledkem projektu SR-CTP. Provedená a níže popsána měření napomohla jak při definici požadavků, tak následný vývoj a testování softwaru xdMeasure.

7.1 KB-6500

7.1.1 Měření ohniska ve viditelném spektru

Pro instalaci optiky do rentgenového tunelu je nutné znát co nejpřesněji ohniskovou vzdálenost celého systému. To je nezbytné, aby bylo možné do ohniska umístit příslušné detektory, které mají po uzavření komory jen omezenou možnost pohybu. Každý z modulů má jinou ohniskovou vzdálenost a v demonstrátoru musí být uloženy za sebou tak, aby bylo ohnisko obou modulů ve stejné ohniskové rovině.

Konstrukce obou modulů je experimentální a není tedy možné se zcela spolehnout na provedené výpočty. Jedinou možností jak provést takové měření je v paralelním svazku viditelného záření. Měření bylo provedeno v Optické laboratoři FS ČVUT.

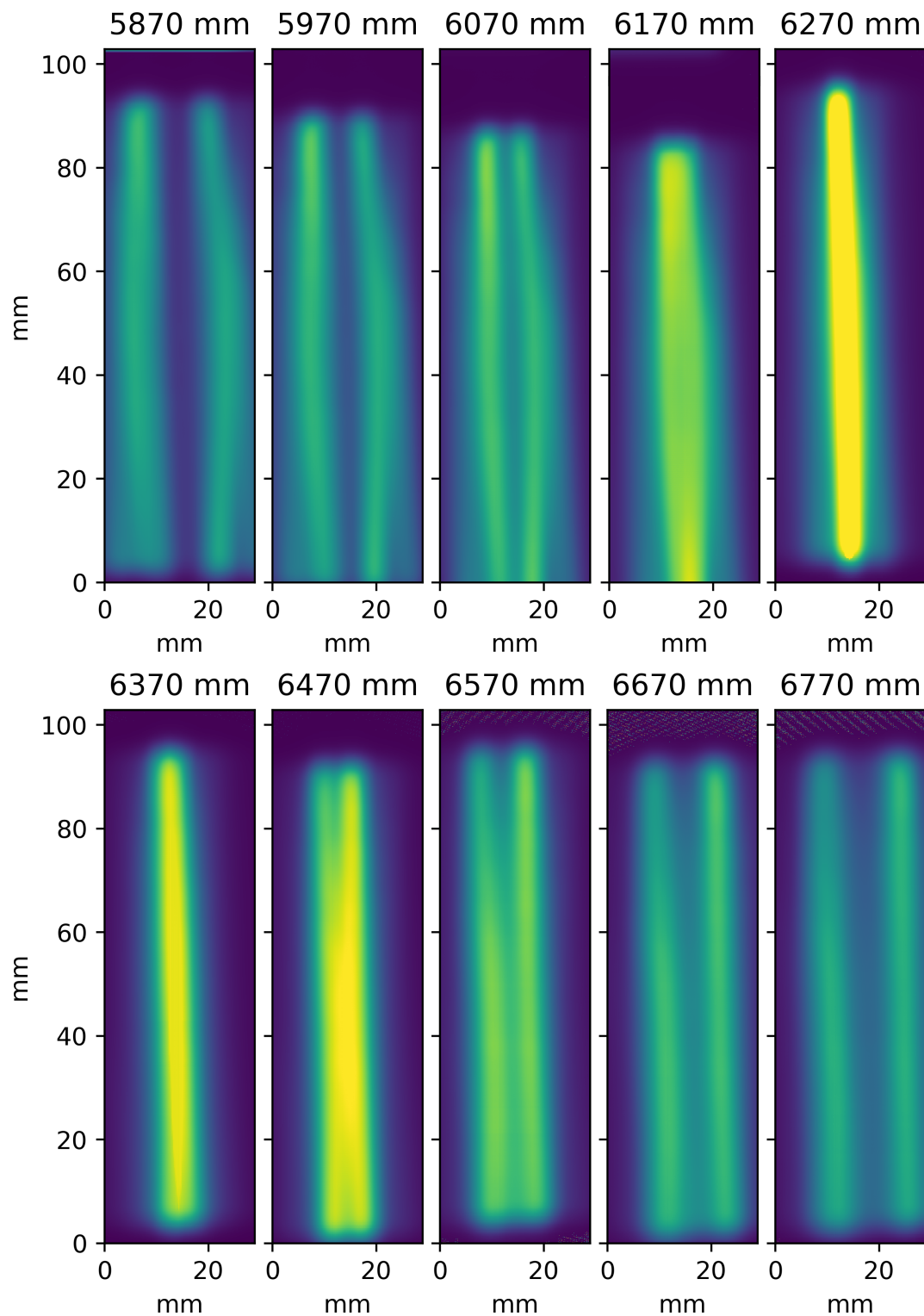
Měřicí aparatura byla složena z:

- Optické lavice s dalekohledem typu Newton o průměru zrcadla 300 mm, sloužící jako kolimátor
- Adaptéru umožňujícího umístění LED do okulárového výtahu
- LED s chladičem a proudovým zdrojem
- Měřené optiky
- Optické lavice v místě ohniska měřené optiky se senzorem

Ohnisko bylo snímáno Hamamatsu skenerem, s celkovým rozlišením až 14000 x 2064 pixelů a plochou 196 x 29 mm. Díky tomu je možné měřit celé 1D ohnisko optiky KB-6500, které má ve vertikální ose délku okolo 8 cm. Skener byl uchycen na optickou lavici, po které byl ručně posouván. Před samotným měřením bylo nutné nastavit kolimátor tak, aby byl výsledný svazek paralelní. Toho bylo dosaženo promítnutím svazku na protilehlou stěnu a měřením průměru promítnutého kruhu. Okulárový výtah dalekohledu s LED byl následně nastaven tak, aby průměr promítaného kruhu odpovídal průměru zrcadla.

Na obrázku 7.1 je snímek ohniska horizontálního modulu pro různé ohniskové vzdálenosti. Na prvních a posledních snímcích jsou jasně rozlišitelné příspěvky obou optik modulu, které se na prostředních snímcích slévají ve společném ohnisku modulu. Vertikální posun ohniska mezi jednotlivými snímky je způsoben ručním posunem a nedostatečným rozsahem optické lavice, která neumožňovala zcela vodorovné seřízení s optikou.

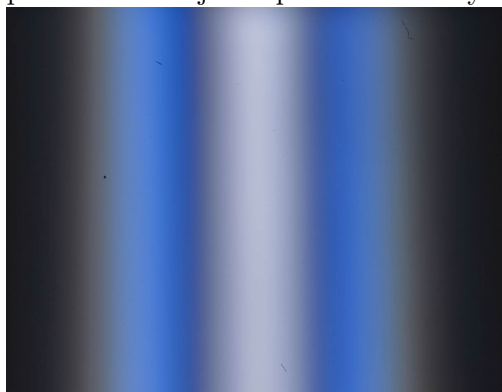
Na některých snímcích je patrné prohnutí ohnisek, připomínající závorky. To je s největší pravděpodobností způsobeno nedokonalou geometrií zrcadla kolimátoru. Měření proběhlo s bílou LED o velikost čipu $400\ \mu\text{m}$.



Obrázek 7.1. Snímek ohniska pro různé fokální vzdálenosti. Zobrazeno ve falešných barvách

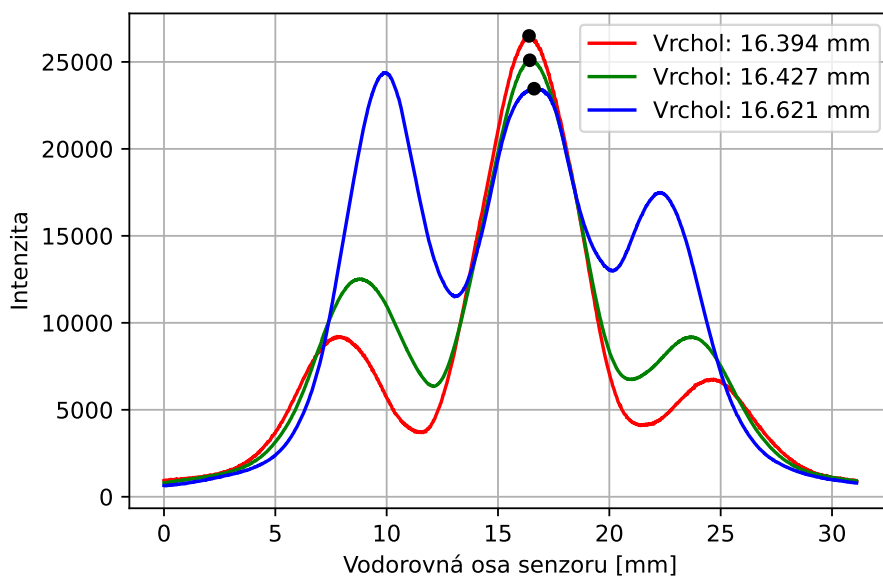
Při měření optiky ve viditelném spektru, dochází k nežádoucí difrakci a rozptylu světla. Z toho důvodu není možné z předchozího měření jednoznačně určit optimální

ohnisko modulu na základě výpočtu FWHM. Na obrázku 7.3 je barevný snímek společného 1D ohniska 1. modulu a v grafu 7.4 průměrná intenzita jednotlivých sloupců pro jednotlivé barevné kanály. V grafu je viditelný stranový posun vrcholu ohniska v závislosti na části barevného spektra, to je způsobeno rozdílným lomem světla na deskách optiky. Dále jsou zřetelné laloky na obou stranách pravého ohniska, způsobené difrakcí světla na deskách. Za pozornost stojí ohnisko modré části spektra, které je nejužší, přestože má největší postranní laloky.



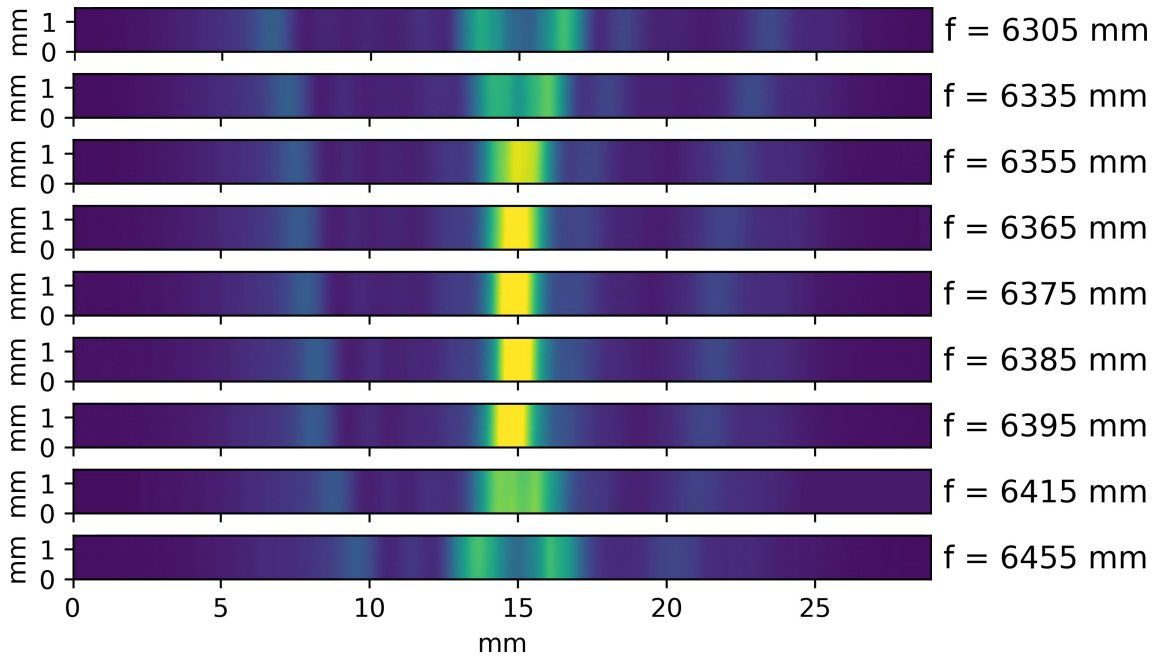
Senzor	NIKON D700
Technologie	CMOS
Velikost pixelu	8,42 μm
Velikost senzoru	36 x 23,9 mm
Rozlišení	4275 x 2831
Expozice	1/100 s
Citlivost v ISO	1600

Obrázek 7.2. Snímek společného ohniska horizontálního modulu

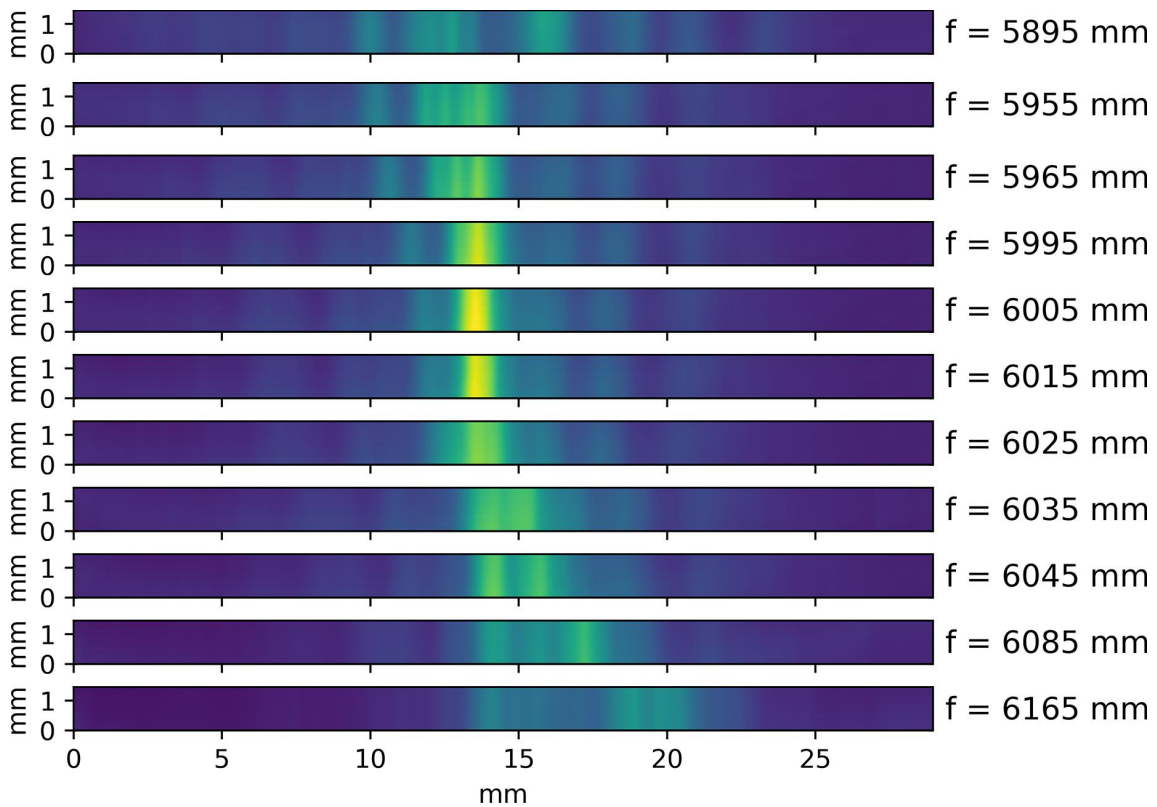


Obrázek 7.3. společné ohnisko horizontálního modulu po zprůměrování sloupců jednotlivých barevných kanálů

Aby byl získán co nejostřejší obraz a nejnižší FWHM, byla pro výsledné měření ohniska použita červená LED o velikosti čipu 150 μm . Na následujících dvou obrázcích jsou snímky pro různé fokální vzdálenosti obou modulů. Z důvodu časové náročnosti již nebyla skenována celá délka ohniska, ale jen 14,7 mm jejich středu.



Obrázek 7.4. Snímek středu ohniska horizontálního modulu pro různé vzdálenosti. Zobrazeno ve falešných barvách



Obrázek 7.5. Snímek středu ohniska vertikálního modulu pro různé vzdálenosti. Zobrazeno ve falešných barvách

Výsledky měření

Modul	Ohnisko	FWHM
Vertikální	$f_{vert} = 6005 \text{ mm}$	1,72 mm
Horizontální	$f_{hor} = 6385 \text{ mm}$	1,47 mm

Tabulka 7.1. Naměřené parametry modulů KB-6500 ve viditelném spektru

Vzdálenost mezi horizontálním a vertikálním modulem při instalaci na sjednocený demonstrátor tedy musí být

$$f_{vert} - f_{hor} - d_{mod} = 80 \text{ mm}$$

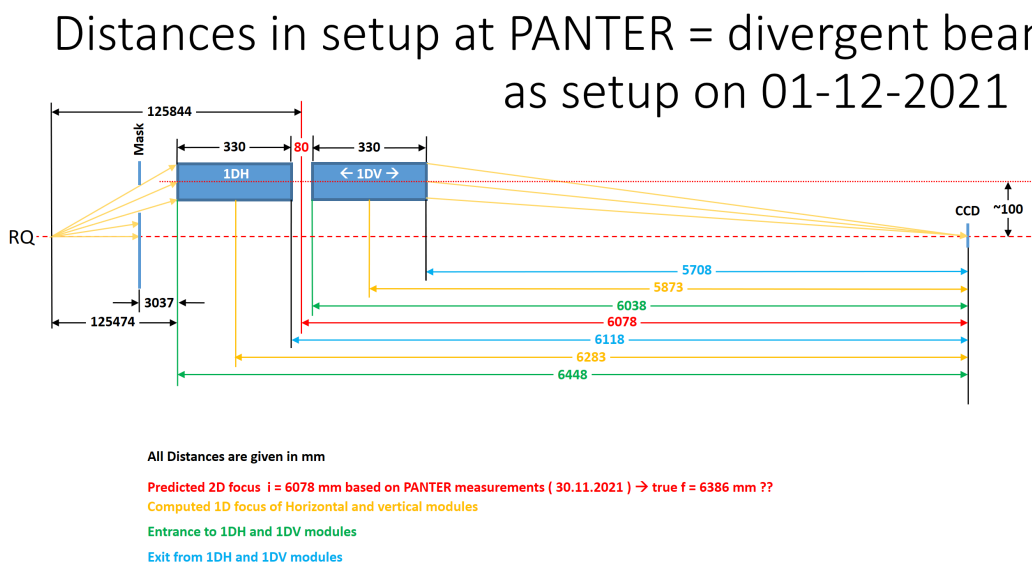
kde je délka modulu $d_{mod} = 300 \text{ mm}$. Společná ohnisková vzdálenost je $f_{spol} = f_{hor} = 6385 \text{ mm}$.

Přestože je FWHM obou modulů srovnatelné, je při porovnání obrázků 7.5 a viditelný rozdíl. U vertikálního modulu na rozdíl od horizontálního netvoří jednotlivé dva potkávající se svazky. Tento jev není způsoben nedokonalostí měření, ale výrobní chybou modulu, která se projevila i při měření v rentgenovém spektru.

7.1.2 Měření v rentgenovém spektru

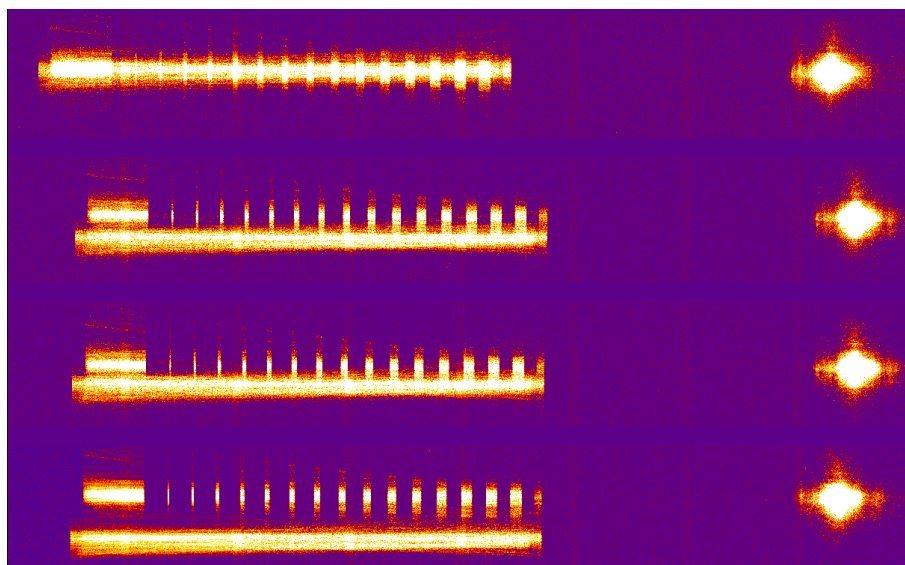
Hlavní měření optiky probíhalo v MPE Panter, jelikož se jedná o jediný rentgenový tunel v Evropě, ve kterém je možné provést měření rentgenové optiky s ohniskem 6500 mm. Pro snímání ohniska byly použity detektory PIXI a TRoPIC. Vzhledem ke vzdálenosti zdroje bylo nutné přepočítat ohniskovou vzdálenost optiky jak je znázorněno na schématu 7.6. Optika byla umístěna na polohovací stolek umožňující náklony v horizontální a vertikální ose.

VB 2021-12-01

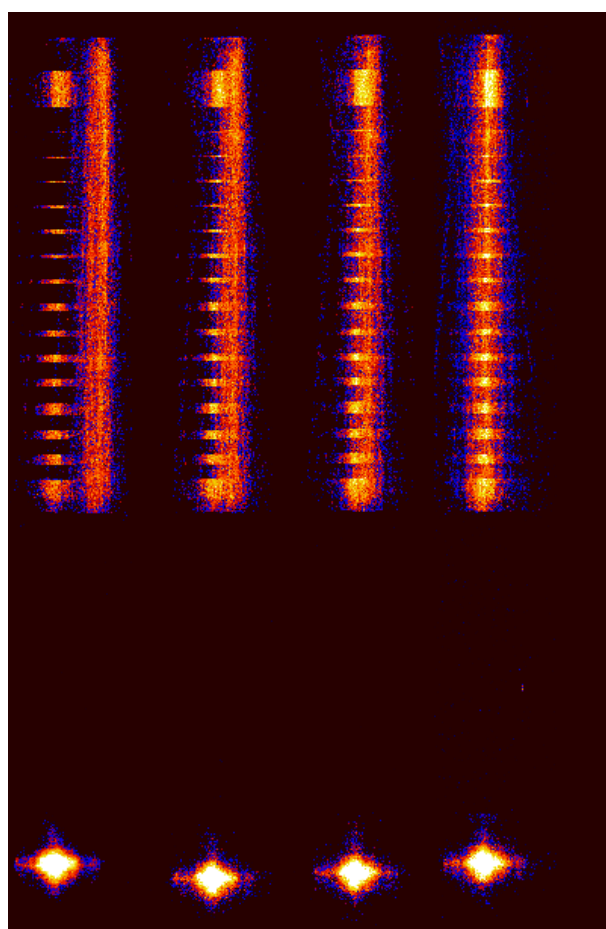


Obrázek 7.6. Vzdálenosti optiky a detektorů v MPE Panter

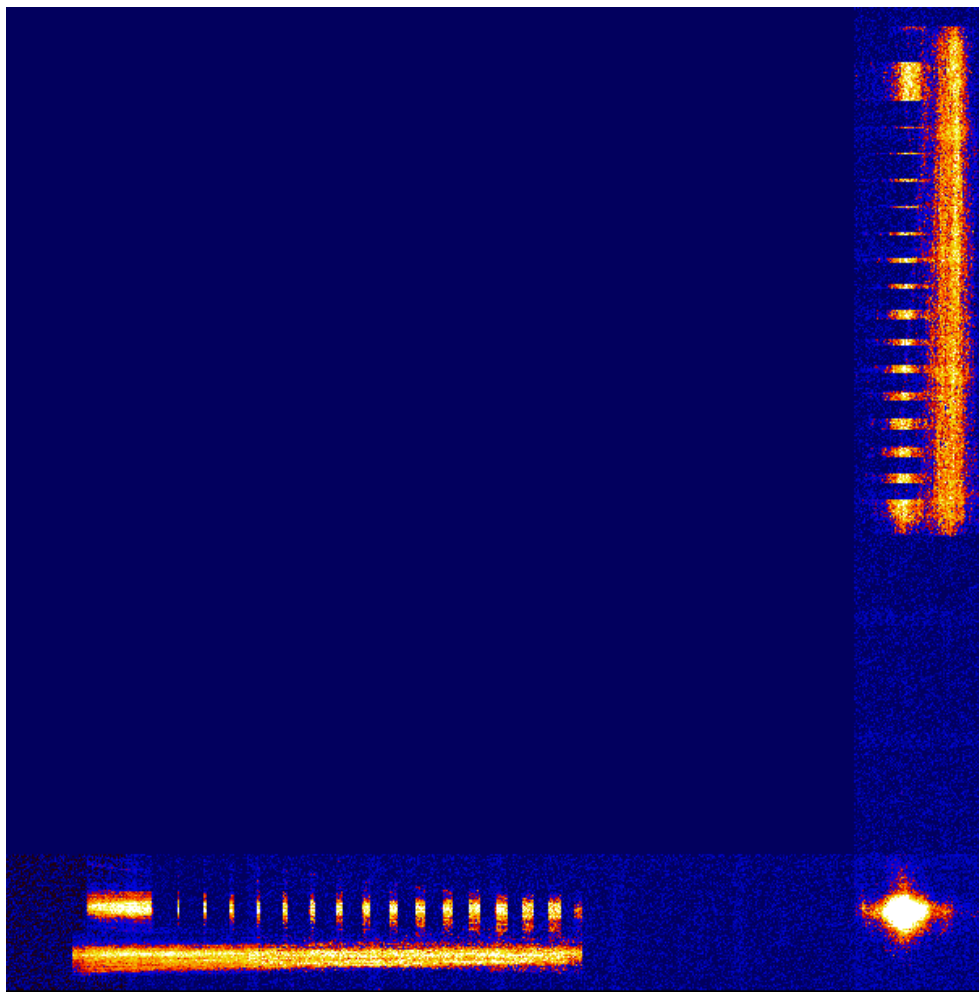
Obrázky 7.7 a 7.8 každý postupně obsahují 4 skeny vertikálního/horizontálního ohniska složeného každý z osmi snímků pro různé polohy.



Obrázek 7.7. Hledání ohniska horizontálního modulu optiky



Obrázek 7.8. Hledání ohniska vertikálního modulu optiky



Obrázek 7.9. Složený snímek celého obrazu za optikou mimo ohnisko

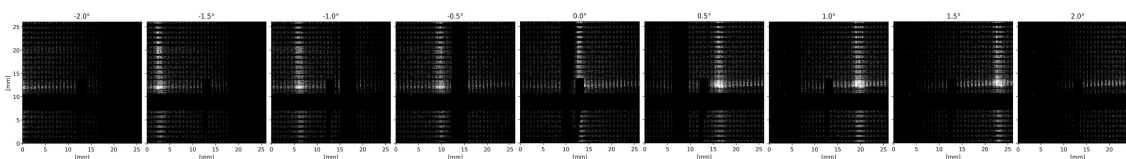
Modul	Ohnisko	FWHM
Vertikální	$f_{vert} = 6166 \text{ mm}$	3,18 mm
Horizontální	$f_{hor} = 66248 \text{ mm}$	3,54 mm

Tabulka 7.2. Naměřené parametry modulů KB-6500 v rentgenovém spektru

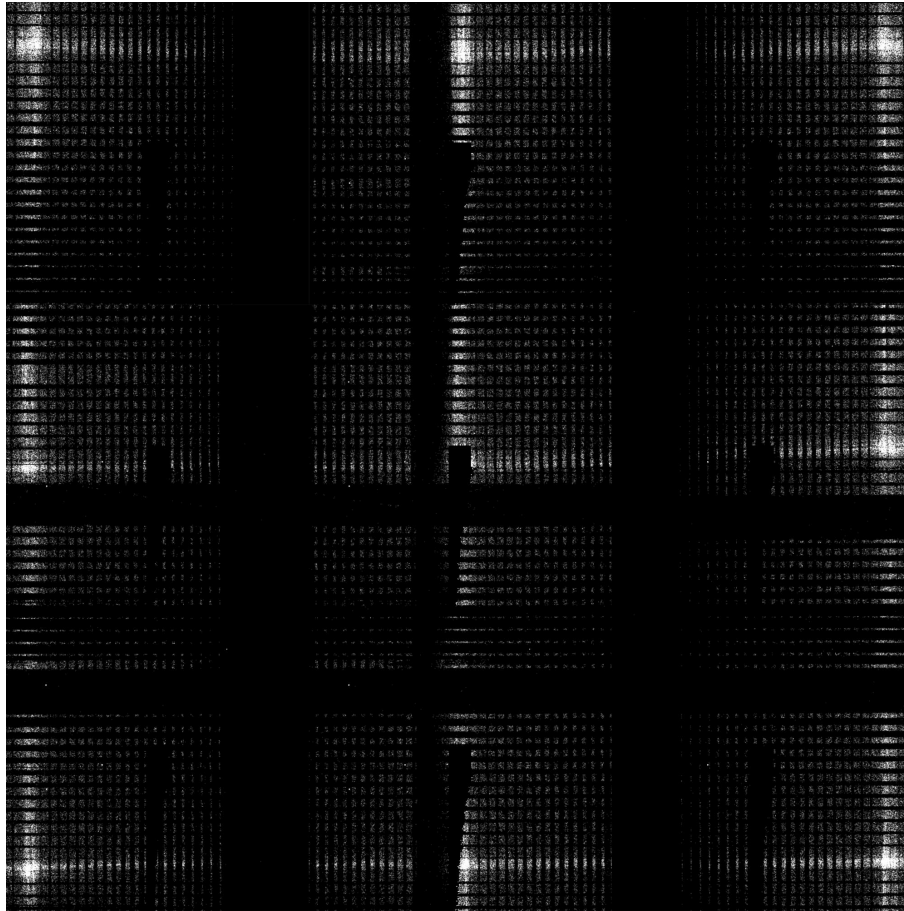
7.2 SR-CTP

7.2.1 Automatické změření v náklonech

Měření byla automaticky provedena programem xdMeasure s využitím nástroje pro 1D skenování.



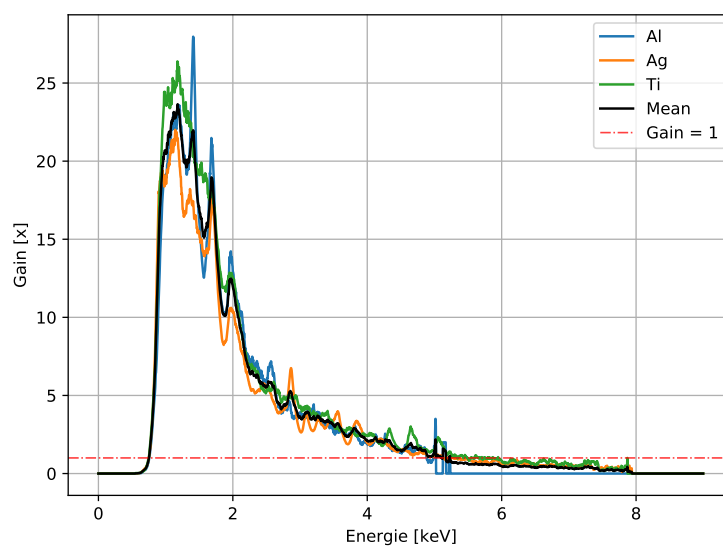
Obrázek 7.10. Automatické změření demonstrátoru pro úhly od -2° do 2°



Obrázek 7.11. Demonstrace zorného pole demonstrátoru sestavená z 9 měření

7.2.2 Měření v MPE Panther

Měření na obrázku 7.12 ukazuje zisk optiky v jejímž ohnisku je umístěn spektrometr Ketek v porovnání s referenčním Ketekem, který optikou vybaven nebyl.



Obrázek 7.12. Zisk optiky v závislosti na energii

Kapitola 8

Závěr

Kosmické projekty jsou náročné a vyžadují velké týmy s širokým rozsahem specializací. Demonstrátor a optika KB-6500, které jsou využívány v této diplomové práci, byly vytvořeny rozsáhlým konsorciem českých firem v rámci projektu ESA SR-CTP (ESA projekt 40001250020/18/NL/GLC/hh).

Přestože diplomová práce probíhala v rámci většího projektu, jednalo se o práci samostatnou a je důležité vymezit co přesně bylo v rámci této práce uděláno.

Byl vytvořen modulární program `xdMeasure` pro automatizovaný sběr dat a jejich následné vyhodnocení. Program/měřicí systém sestává z řady připojených RTG senzorů, včetně ovládání motorků až 5osého souřadnicového systému. Ovládání může být jednoúčelovými skripty, nebo pomocí grafického rozhraní.

Takto vzniklý měřicí systém byl následně testován na demonstrátoru a optice KB-6500 u něhož zabezpečil justáž optických os, správné sesazení optických rovin a proměření kvality ohniska u nezobrazující optiky typu račí oko.

Práce byly postupně prováděny v optické laboratoři FS ČVUT (v optické oblasti), v termovakuovém tunelu ve VZLU Praha (v rentgenové oblasti) a konečné měření na nejdelším RTG tunelu v Evropě v Ústavu Maxe Plancka v Mnichově na zařízení Panter (v rentgenové oblasti). Podařilo se tak splnit cíl, vyvinout měřicí systém a připravit optiku demonstrátoru v rámci ESA projektu pro použití v budoucí družicové misi.

Vytvořený měřicí systém se skládá z následujících částí, které jsou podrobně popsány v předkádané práci.

- Implementace následujících zařízení do `xdMeasure`, včetně tvorby knihoven umožňujících ovládání z jazyka Python:
 - Pixelové detektory Timepix a Timepix QUAD
 - Řádková kamera Hamamatsu
 - Rentgenové spektrometry Ketek a VZLU SXD
 - Posuvné a rotační stolky firmy Standa
- Uživatelské grafické rozhraní včetně:
 - Univerzálního ovládání připojených spektrometrů, se zobrazením naměřených dat v reálném čase
 - Univerzálního ovládání připojených CCD a pixelových detektorů, se zobrazením naměřených dat v reálném čase
 - Rozhraní pro ovládání posuvných a rotačních stolků Standa
- Skripty pro zpracování dat:
 - Vizualizace naměřených rentgenových spekter s automatickou detekcí vrcholů
 - Výpočet a zobrazení gainu optiky, při použití referenčních senzorů
 - Zpracování a následné zobrazení naměřených dat z MPE Panter ve formátu FITS
 - Výpočet horizontálního a vertikálního FWHM z naměřených dat
 - Vizualizace měření Hamamatsu skenerem

-
- Vyroben skener schopný pořizovat snímky o velikosti až 196 x 29 mm v širokém rozsahu spekter. Jak po mechanické, tak po softwerové stránce.
 - Provedena automatická měření demonstrátoru v náklonech v rentgenovém tunelu VZLU za použití xdMeasure.
 - Změřena ohniska KB-6500 ve viditelném spektru.
 - Při měření v MPE Panter zabezpečoval autor práce zapojení, oživení a funkčnost měřicího řetězce jako celku.

Vzhledem k unikátnosti komponent, byla práce komplikována omezeným přístupem k většině hardware a nutností přizpůsobovat se vývoji ostatních prací na demonstrátoru a KB-6500.

Při měření optiky ve viditelném spektru se projevila vada optiky, která byla následně potvrzena v MPE Panter. To prokázalo přínosnost takového měření. Zajímavé výsledky by mohlo přinést měření KB-6500 pro více částí spektra. Výsledky by pak bylo možné porovnat s rentgenovým měřením v MPE Panter a lépe tak porozumnět rozdílům v chování optiky mezi rentgenovým a světelným měřením. Mimořádně přínosné by mohlo být využití vlnové délky 200–300 nm, která je blíže rentgenové vlnové délce, nevyžaduje speciální vybavení a je dobře snímatelná Hamamatsu skenerem.

Výsledek této práce přispívá k vědeckému poznání v oblasti astrofyziky, neboť přináší nástroj pro efektivnější testování rentgenových optik pro vesmírné teleskopy, jejichž cílem je pozorování rentgenových zdrojů v kosmu.

Literatura

- [1] VÝZKUMNÝ A ZKUŠEBNÍ LETECKÝ ÚSTAV, A.S. Smlouva o zajištění vypuštění družice VZLUSAT2 do vesmíru na nízkou orbitu Země. 21.2.2020. Praha. Dostupné také z:
<https://smlouvy.gov.cz/smlouva/11822492?backlink=p7m75>
- [2] Presskit for the eROSITA First All-Sky Survey. Max Planck Institute for extra-terrestrial Physics [online]. [cit. 2022-01-03]. Dostupné z:
<https://www.mpe.mpg.de/7461950/erass1-presskit>
- [3] X-ray tube (scheme). Wikimedia Commons: The free media repository [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-12-30]. Dostupné z:
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Roentgen-Roehre.svg>
- [4] RNDr. Jaroslav Kusala. Rentgenové záření: minicyklopedie rentgenového záření [online]. 2004 [cit. 2022-01-03]. Dostupné z:
<https://www.cez.cz/edee/content/microsites/rtg/rtg.htm>
- [5] THOMPSON, Albert. X-Ray Data Booklet [online]. 3. Lawrence Berkeley National Laboratory: Center for X-ray Optics and Advanced Light Source, 2009 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z:
<https://xdb.lbl.gov/xdb-new.pdf>
- [6] SNIGIREV, Anatoly A., B. FILSETH, Pascal ELLEAUME, et al. Refractive lenses for high-energy x-ray focusing [online]. In: . 1997-12-11, s. 164-170 [cit. 2021-12-17]. Dostupné z: doi:10.1117/12.294496
- [7] BECKHOFF, Burkhard, habil. Birgit KANNGIESSER, Norbert LANGHOFF, Reiner WEDELL a Helmut WOLFF, ed. Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis [online]. 1. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006 [cit. 2022-01-03]. ISBN 978-3-540-28603-5. Dostupné z:
<https://books.google.cz/books?id=c6d8EPYHn1EC&pg=PA501>
- [8] Vladimír Dániel, Veronika Maršíková, Adolf Inneman, Ladislav Pína, Rene Hudec, Karel Pelc Small spacecraft payload study for X-ray observation of GRBs. [cit. 2022-01-03].
- [9] Wolter Telescope. Wikimedia Commons: The free media repository [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-12-30]. Dostupné z:
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wolter-telescope.png>
- [10] ESA Earth Observation Portal XMM-Newton (X-ray Multi-Mirror Mission-Newton) Observatory [online][cit. 2021-12-16]. Dostupné z:
<https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/xmm-newton>
- [11] KIRKPATRICK, Paul a A. V. BAEZ. Formation of Optical Images by X-Rays. Journal of the Optical Society of America [online]. 1948, 38(9), [cit. 2021-12-16]. ISSN 0030-3941. Dostupné z: doi:10.1364/JOSA.38.000766

-
- [12] HUDEC, R., et al. Kirkpatrick Baez X-ray optics for astrophysics: Recent status. Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso. 2018, 48(3), 437-445. ISSN 1335-1842.
- [13] Proposed NASA Mission Employs “Lobster-Eye” Optics to Locate Source of Cosmic Ripples. Nasa.gov [online]. [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/proposed-nasa-mission-employs-lobster-eye-optics-to-locate-source-of-cosmic-ripples>
- [14] PINA Ladislav, Rene HUDEC, Veronika MARSIKOVA, et al. X-ray multi-foil optical system for CubeSat demonstrator. In: Advances in X-Ray/EUV Optics and Components XIV [online]. SPIE, 2019, 2019-9-9, s. 34- [cit. 2021-12-30]. ISBN 9781510629097. Dostupné z: doi:10.1117/12.2543412
- [15] ČSN EN ISO 14644-1. Čisté prostory a příslušné řízené prostředí - Část 1: Klasifikace čistoty vzduchu podle koncentrace částic. 2016. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [16] BRAEUNINGER, Heinrich, Oberto CITTERIO, Stephen L. O'DELL, et al. Calibration of hard x-ray (15 - 50 keV) optics at the MPE test facility PANTER [online]. In: . 2004-1-29, s. 283- [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: doi:10.1117/12.507999
- [17] BURWITZ, Vadim, Richard WILLINGALE, Carlo PELLILCIARI, et al. Testing and calibrating the ATHENA optics at PANTER. In: Optics for EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Astronomy VIII [online]. SPIE, 2017, 2017-10-13, s. 23- [cit. 2021-12-18]. ISBN 9781510612556. Dostupné z: doi:10.1117/12.2274237
- [18] JAKOUBEK, Jan. Do you need an imaging detector with a hole in the middle? Linkedin.com [online]. Praha: ADVACAM, 2019 [cit. 2021-12-16]. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/do-you-need-imaging-detector-hole-middle-jan-jakubek>.
- [19] PIXET Pro User's Manual. ADVACAM s.r.o., Praha 7, 30.9. 2020
- [20] CCD Image Sensor S11071/S10420-1 series Datasheet. KMPD1120E12. Hamamatsu City: Hamamatsu Photonics K.K, Solid State Division, 2021.
- [21] Driver circuit for CCD image sensor C11287/C11288 KACC1173E06. Hamamatsu City: Hamamatsu Photonics K.K, Solid State Division, 2021.

Příloha A

Symbole a zkratky

A.1 Zkratky

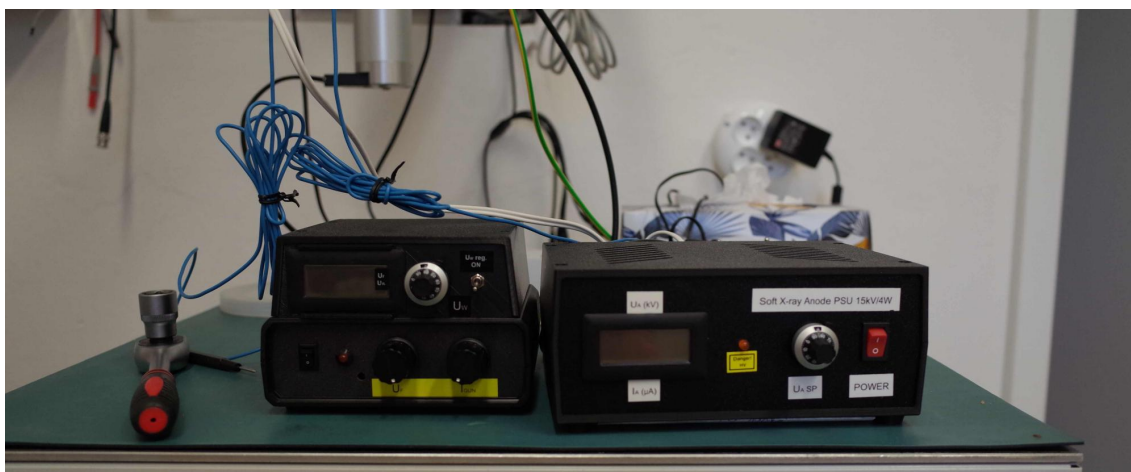
COTS	Comercial Of The Shelf
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BNC	Bayonet Neill Concelman connector
CCD	Charge-coupled device
CERN	Evropská organizace pro jaderný výzkum
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
COM	Communication port
COTS	Commercial off-the-shelf
CT	Computed Tomography
ESA	European Space Agency
FFC	Flat Flexible Cable
FITS	Flexible Image Transport System
FS ČVUT	Fakulta strojní ČVUT
FWHM	Full width at half maximum
GND	Elektrická země
GUI	Graphical user interface
I2C	Inter-Integrated Circuit
ISO	International Organization for Standardization
JSON	JavaScript Object Notation
LED	Light-emitting diode
LGPLv3	GNU Lesser General Public License v3
MPG	Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PCB	Printed circuit board
PNG	Portable Network Graphics
RTG	Rentgen
SDD	Silicon Drift Detector
SXD	Space X-Ray Dosimeter
TRL	Technology readiness levels
UART	Universal asynchronous receiver-transmitter
USB	Universal Serial Bus
UTEF	Ústav technické a experimentální fyziky
VGA	Video Graphics Array
VN	Vysoké napětí
VZLU	Výzkumný a zkušební letecký ústav, as.

A.2 Symboly

E	Energie záření [keV]
Z	Protonové číslo
A	Relativní atomová hmotnost
h	Planckova konstanta; $6,62607015 \cdot 10^{-34} J s$
ρ	Hustota [$\frac{g}{cm^3}$]
λ	Vlnová délka fotonu [m]
c	Rychlost světla; $299\,792\,458\, ms^{-1}$
<i>f_vert</i>	Ohnisková vzdálenost vertikálního modulu KB-6500 [mm]
<i>f_hor</i>	Ohnisková vzdálenost horizontálního modulu KB-6500 [mm]
<i>d_mod</i>	Délka jednoho modulu KB-6500 [mm]
<i>f_spol</i>	Ohnisková vzdálenost optiky KB-6500 [mm]

Příloha B

Obsluha rentgenového zářiče



Obrázek B.1. Vlevo nastavení žhavení a wehneltova napětí, napravo vysokonapěťový zdroj anodového napětí 15 kV / 4 W

Rentgenka je experimentální zařízení a její zapnutí se sestává z 11 kroků ve 3 skupinách. Nastavení anodového napětí:

- Kontrola kabeláže a uzemění rentgenky
- Zapojení regulátoru a VN zdroje do zásuvky
- Zapnutí VN zdroje přepínačem POWER
- Nastavit anodové napětí U_a (kV) potenciometrem U_a SP na 15 kV

Nastavení žhavicího proudu:

- Nastavit nulový proud otočením U_f a I_{gun} protisměru hodinových ručiček do krajní pozice a vypnout automatický regulátor přepnutím U_w reg. ON do dolní polohy
- Otočit omezovač proudu žhavením I_{gun} o čtvrt otočky po směru hodinových ručiček
- Nastavit žhavicího proudu otáčením U_f po směru hodinových ručiček, dokud není proud I_a v rozmezí -10 až -15 (μA). Proud I_a určuje intenzitu rentgenového záření
- Otáčet I_{gun} protisměru hodinových ručiček, dokud nezačne být I_a omezen

V tuto chvíli je rentgenka v provozu, ale paprsek není zaostřen a stabilizován k tomu slouží regulátor Wehneltovo napětí. To je nastaveno následovně:

- Otáčením I_{gun} protisměru hodinových ručiček snížit napětí U_f o 0,5 V - Otočit U_f o 5 otoček po směru hodinových ručiček
- Přepnout přepínač U_w reg. ON do horní polohy, a potenciometrem U_w nastavit napětí U_w na -180 V

S tímto nastavením je paprsek elektronů zaostřen na anodu a je stabilizována intenzita rentgenového záření.

Příloha C

Obsah přiloženého CD

Podklady	Citované dokumenty
PouziteObrázky	V práci použité obrázky
Foto	Fotografie pořízené v průběhu práce
Data	Ukázka naměřených dat
xdMeasure	Zdrojové kódy vyvinutého SW
tex	Kompletní projekt diplomové práce v TEXu
DP_Skvor.pdf	Diplomová práce