



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ  
FAKULTA**  
Univerzita Karlova

## **BAKALÁRSKA PRÁCA**

Samuel Kočiščák

# **Návrh detektora UV žiarenia pre aplikáciu na družici v slnečnom vetre**

Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Vedúci bakalárskej práce: doc. RNDr. Jiří Pavlů, Ph.D.

Študijný program: Fyzika

Študijný odbor: Obecná fyzika

Praha 2019

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V ..... dne .....

Podpis autora

Autor ďakuje kolegom a priateľom za nespočet cenných rád a trpezlivú pomoc počas celej práce, menovite predovšetkým vedúcemu práce, pánu doc. Pavlú, za všetko od výkladu teórie až po pomoc v laboratóriu. Ďalej pani prof. Šafránkovej, pánu prof. Němečkovy a pánu doc. Přechovi za početné konzultácie využitia nadobudnutých poznatkov a vhlad do súčasných kozmických experimentov a budúcich misií, pánu Dr. Nouzákovi a pánu Bartoňovi za zdieľanie skúseností a cennú pomoc predovšetkým ale nie len technickej povahy. Ďalej autor ďakuje pánu Hejdovi za pomoc pri konštrukcii experimentu, pracovníkom Skupiny kozmickej fyziky za technické podklady, pracovníkom Skupiny tenkých vrstiev za pomoc s prípravou experimentu a pracovníkom Skupiny vákuovej fyziky za zapožičanie experimentálneho vybavenia.

Autor v neposlednom rade ďakuje sirovi Fcancisovi Baconovi za formuláciu induktívnej metódy a Jamesovi A.R. Samsonovi, ktorého súhrnné dielo v oblasti fyziky svetla do veľkej miery autorovi pomohlo získať potrebný prehľad.

Názov práce: Návrh detektora UV žiarenia pre aplikáciu na družici v slnečnom vetre

Autor: Samuel Kočiščák

Katedra: Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Vedúci bakalárskej práce: doc. RNDr. Jiří Pavlů, Ph.D., Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Abstrakt: Mnoho citlivých družicových meraní je ovplyvnených UV žiarením vyvolávajúcim fotoemisiu na citlivých elektronických komponentoch. Informácia o UV osvite družice je preto pre mnoho experimentov cenná. Špeciálne užitočná je rýchla informácia, ktorá umožní zistiť prudké zmeny UV osvitu na časových škálach kratších ako 1 s.

Cieľom práce bolo zostaviť a otestovať funkčnosť prístroja schopného kontinuálne merať UV osvit družice, fungujúceho práve na princípe fotoemisie z kovovej katódy. Podarilo sa nám úspešne demonštrovať funkčnosť prototypu a určiť niektoré z jeho kľúčových charakteristík, okrem iného aj jeho trvácnosť v kozmickom prostredí.

Kľúčové slová: VUV, Faradayov valec, UV detektor, UV priepustnosť, slnečný vietor

Title: Development of UV Detector for Space Applications

Author: Samuel Kočiščák

Department: Department of Surface and Plasma Science

Supervisor: doc. RNDr. Jiří Pavlů, Ph.D., Department of Surface and Plasma Science

Abstract: It is not unusual that space measurement is influenced by UV irradiation causing photoemission on delicate electronic components. Therefore information on UV irradiance is very useful. Particularly useful is non-delayed, immediate quantitative information (on a time scales of seconds) identifying unexpected variation in the irradiance of such electronic parts.

The goal was to construct a prototype, measure basic properties and discuss capabilities of a detector capable of continuous measurement of UV irradiance of a spacecraft, working on the principle of photoemission alone. We have successfully shown the capabilities of a prototype and established some of its key basic properties, e.g. their stability in cosmic environment.

Keywords: VUV, Faraday cup, UV detector, UV transmittance, solar wind

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>2</b>
1.1	Motivácia . . . . .	2
1.2	Spektrum slnečného svetla . . . . .	3
1.2.1	Lyman alfa . . . . .	4
1.3	Súčasnú metódu merania UV v kozmickom prostredí . . . . .	4
1.3.1	Fotografické určenie spektrálnej hustoty . . . . .	4
1.3.2	Plynové absorpčné komory . . . . .	5
1.4	Princíp navrhovaného detektora . . . . .	6
1.4.1	Fotokatódy . . . . .	6
1.4.2	VUV priehľadné materiály . . . . .	7
1.4.3	Fotoemisný UV detektor . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Ciele práce</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Laboratórne merania</b>	<b>10</b>
3.1	Konštrukcia prototypu . . . . .	10
3.1.1	Okno . . . . .	10
3.1.2	Kolektor . . . . .	11
3.1.3	Telo . . . . .	11
3.2	Aparatúra a usporiadanie . . . . .	12
3.2.1	Komponenty aparatúry . . . . .	12
3.2.2	Priepustnosť okna – experimentálne usporiadanie . . . . .	13
3.2.3	Meranie uhlovej závislosti citlivosti – experimentálne usporiadanie . . . . .	14
3.2.4	Simulácia starnutia – experimentálne usporiadanie . . . . .	15
3.3	Výsledky merania . . . . .	16
3.3.1	Priepustnosť okna . . . . .	16
3.3.2	Meranie uhlovej závislosti citlivosti . . . . .	18
3.3.3	Simulácia starnutia . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Diskusia výsledkov a využitie</b>	<b>20</b>
4.1	Ly- $\alpha$ . . . . .	20
4.2	Starnutie a odolnosť . . . . .	20
4.3	Možné ďalšie pokračovanie . . . . .	20
4.4	Využitie . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Záver</b>	<b>22</b>
	<b>Zoznam použitej literatúry</b>	<b>23</b>
	<b>Zoznam obrázkov</b>	<b>25</b>

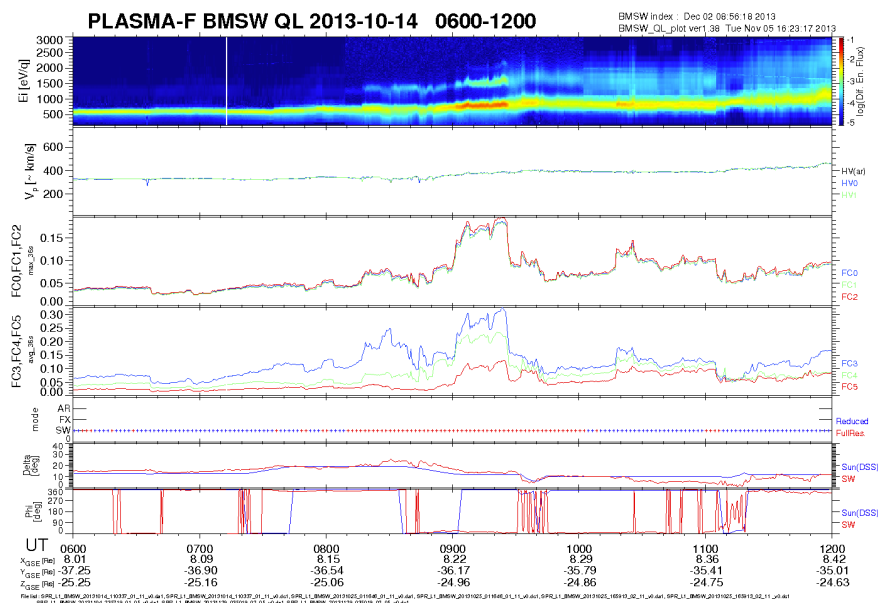
# 1. Úvod

## 1.1 Motivácia

Družicové merania môžu byť ovplyvnené osvitom slnečným žiarením. Okrem zjavného vplyvu na teplotu družice, citlivé elektrické merania (antény, Faradayove valce, kanálikové násobiče...) môžu byť zásadne ovplyvnené fotoelektrickými účinkami svetla. Špeciálne, problémy spôsobuje predovšetkým UV žiarenie, keďže to je dosť energetické na to, aby s veľkou pravdepodobnosťou vyvolalo fotoemisiu a ovplyvnilo tak citlivé elektrické merania. Detekovať pritom tento vplyv priamo zasiahnutým prístrojom býva obtiažne, napríklad zmena potenciálu okolia družice sa v mnohých prípadoch prejaví presne tak, ako osvit UV žiarením. Mnoho prístrojov je schopných kalibrácie na UV žiarenie (pozadie), ale nie za súčasného fungovania.

Dobrym príkladom je experiment KFPP MFF UK pod názvom *BMSW – Bright Monitor of Solar Wind* fungujúci na princípe niekoľkých Faradayových valcov. Tento je priamym osvitom slnečným žiarením značne ovplyvnený, ale vhodnou kombináciou potenciálov na selekčných mriežkach použitých valcov možno zistiť okamžitú hodnotu fotoprúdu, no je pre to nutné pozastaviť riadne meranie. Pre presnejší popis kalibračnej procedúry viď Šafránková a kol. (2013). Problematiký preto nie je samotný osvit (jeho hodnotu je možné v pravidelných intervaloch určiť), ale jeho rýchle zmeny (spôsobené napríklad slnečnými udalosťami), ktoré nedokáže samotný prístroj správne identifikovať.

Detektor, o ktorého konštrukciu sa usilujeme, by mal byť schopný detekovať prudké zmeny UV osvit, ktoré experimentálne meracie prístroje nedokážu odlišiť od skutočne zaujímavej zmeny udalosti v okolitom prostredí.

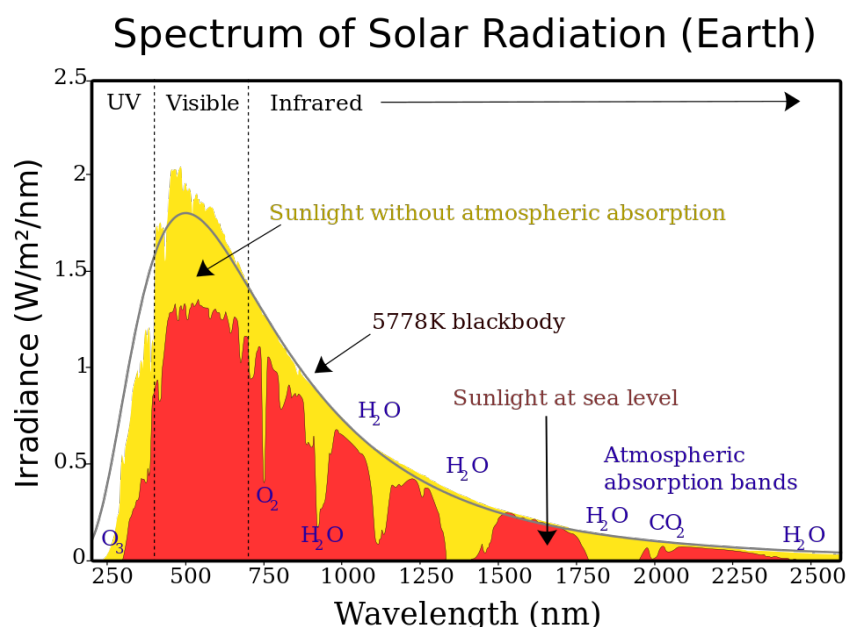


Obr. 1.1: Parametre slnečného vetra merané experimentom BMSW, ukážka dát prevzatá z MFF & SRI of RAOs (2013)

Pri meraní prúdu častíc z iného zdroja, než je Slnko (menšie telesá: Mesiac, kométa...) môže byť UV osvit ešte oveľa variabilnejší, keďže povrchy telies sa natáčajú k Slnku a od Slnka pomerne rýchlo, obežné rýchlosti sú vysoké a osvit na zatienenej strane týchto telies klesá až k nule.

## 1.2 Spektrum slnečného svetla

Slnečné spektrum je veľmi zložitá, spojitá s niekoľkými výraznými čiarami a pokrýva oblasť od FIR (ďalšie infračervené, *far infrared*, vlnové dĺžky 10  $\mu\text{m}$  až 1 mm) až po VUV (ďalšie ultrafialové svetlo, *vacuum ultraviolet*, *extreme ultraviolet*, vlnové dĺžky 50 nm až 200 nm). Jeho spektrum pripomína spektrum vyžarovania absolútne čierneho telesa pri teplote zhruba 5800 K. Približný tvar slnečného spektra ukazuje obrázok 1.2.



Obr. 1.2: Spektrálna hustota slnečného žiarenia, prevzaté z Wikipedia: Solar spectrum

V UV zložke slnečného žiarenia sa spektrum odlišuje od žiarenia čierneho telesa výrazne, najmä kvôli riedkemu čiarovému spektru v Slnku prevládajúcich ľahkých prvkov. Určenie spektrálneho zloženia UV zložky slnečného svetla nie je jednoduché, keďže VUV je všeobecne veľmi dobre tlmené sklom aj plynmi. Prepúšťané je v oblasti medzi viditeľným svetlom a 100 nm niektorými fluoridmi (Samson, 1967, str. 180–184).

Ďalšou komplikáciou je premenlivosť slnečného spektra, hoc sa slnečné spektrum mení počas roka a slnečného cyklu vo viditeľnej oblasti iba nevýrazne, vo VUV oblasti značne (Detwiler, C. R. and others, 1958), čo je vidieť napríklad na variácii polohy magnetopauzy, ktorá sa s množstvom dopadajúceho žiarenia mení až o polomer Zeme (Nemecek a kol., 2016).

### 1.2.1 Lyman alfa

Ionizačná energia relaxovaného atómu vodíka  ${}^1\text{H}$  je  $1Ry$ ;  $1Ry \approx 13.6\text{ eV}$ , čo energeticky zodpovedá fotónu vlnovej dĺžky  $91.2\text{ nm}$ . Pre osamotený vodíkový atóm platí jednoduché Rydbergovo pravidlo, ktoré hovorí, že na prechod z  $n$ -tej na  $m$ -tú energetickú hladinu (s konvenciou, že relaxovaný vodíkový atóm má jeden elektrón na hladine 1) je potrebné dodať atómu energiu

$$E = \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) Ry, \quad (1.1)$$

kde ak za  $n$  dostadíme hodnotu 1, tak  $E$  sú diskétne hodnoty zodpovedajúce  $(m - 1)$ -ým čiaram Lymanovej série.

Lymanova séria, pomenovaná po Theodoreovi Lymanovi, ktorý ju popísal roku 1906, je teda séria čiar zodpovedajúcich prechodom elektrónu v obale vodíka medzi hladinami 1 a  $m$ ,  $m \geq 2$ . Tieto prechody indexujeme Gréckymi písmenami podľa rastúcej energie postupne  $\text{Ly-}\alpha$ ,  $\text{Ly-}\beta$ ,  $\text{Ly-}\gamma$ , ...,  $\text{Ly-}\infty$ , pričom  $\text{Ly-}\infty$ , prirodzene, zodpovedá ionizačnej energii relaxovaného osamoteného atómu vodíka. Celá Lymanova séria leží v oblasti VUV žiarenia.

Prechody medzi hladinami 2 a  $m$ ,  $m \geq 3$  zodpovedajú čiarom tzv. Balmerovej série, prechody medzi hladinami 3 a  $m$ ,  $m \geq 4$  tzv. Paschenovej sérii. Balmerova séria je veľmi významná, keďže leží v oblasti viditeľného svetla.

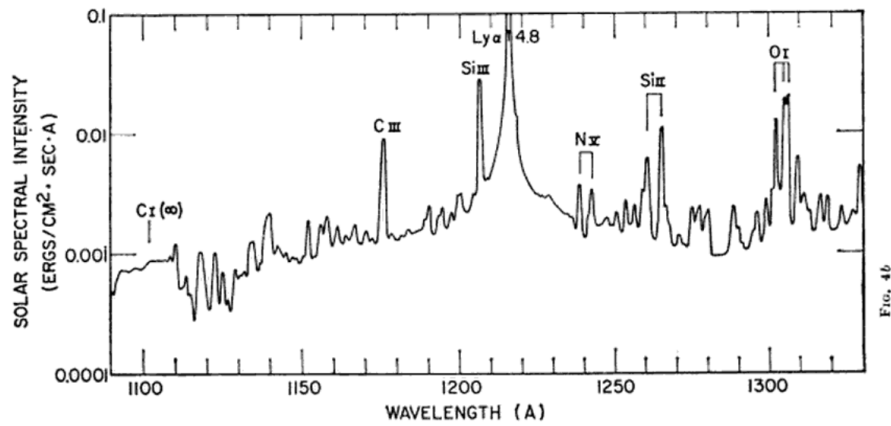
Veľký význam má práve  $\text{Ly-}\alpha$  (prechod medzi hladinou 1 a 2), ako veľmi osamotená čiara, prvá čiara za Balmerovou sériou. Vlnová dĺžka  $\text{Ly-}\alpha$  je  $121.5\text{ nm}$  a prislúcha jej energia  $10.2\text{ eV}$ .

## 1.3 Súčasné metódy merania UV v kozmickom prostredí

### 1.3.1 Fotografické určenie spektrálnej hustoty

Fotografické určenie spektrálnej hustoty vyžarovania je pomerne stará metóda, aplikáciám tejto metódy aj na VUV žiarenie sa venujú napríklad Kenneth Mees (1931), Detwiler, C. R. and others (1958) a Samson (1967, str. 180–184). Hoc na priebežné určovanie aktuálnej spektrálnej hustoty sú fotografické platne prakticky nepoužiteľné, súhrnné výsledky tejto metódy sú zaujímavé. V grafe na obrázku 1.3 vidno spektrum namerané touto metódou 19. apríla 1960 vo výške približne  $200\text{ km}$  nad zemským povrchom.





Obr. 1.3: Spektrálna hustota slenčného žiarenia vo VUV oblasti spektra, prevzaté z Detwiler, C. R. and others (1958)

### 1.3.2 Plynové absorpčné komory

Plynové absorpčné komory fungujú na princípe laditeľnej priehľadnosti komory naplnenej zriedeným plynom (pre Ly- $\alpha$  merania vodíkom, inak typicky aj héliom), cez ktorú fotocitlivý prvok (napr. kanálikový fotonásobič) pozoruje prenikajúce svetlo. Komora má vstupné a výstupné okienko z UV-priehľadného materiálu (vhodného fluoridu) a priehľadnosť plynu v nej je ladená buď zmenou tlaku plynu (typicky héliové komory) alebo zmenou úrovne disociácie plynu (vodíkové komory).

Zatiaľ čo molekuly  $H_2$  sú pre Ly- $\alpha$  úplne priesvitné, atomárny vodík svetlo tejto vlnovej dĺžky veľmi efektívne rozptyľuje, následkom čoho sa svetlo nedostane do fotonásobiča. Úroveň disociácie je za nízkoteplotných podmienok a pri nízkom tlaku efektívne nulová, zvýšiť ju možno vyhrievaním vloženého odporového (wolfrámového) vlákna. Molekula  $H_2$  dopaduvšia na odporové vlákno je disociovaná na atómy, ktoré po čase rekombinujú na molekulu  $H_2$ .

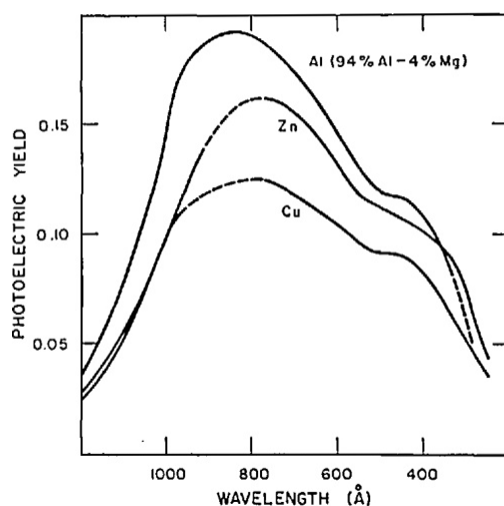
Plynové absorpčné komory boli mnohokrát úspešne použité aj na meranie úrovne Ly- $\alpha$  v okolí Zeme (PROGNOZ 5 a 6 — pre popis experimentu a presnejší popis použitých komôr viď Bertaux, J. L. and others (1985)).

Keďže zmenou úrovne dopplerovského posunu spôsobeného vysokou rýchlosťou disociovaných atómov vodíku odlietavajúcich od odporového kúrenia možno premerať aj intenzitu osvetlenia vlnovými dĺžkami v okolí Ly- $\alpha$ , plynové komory určujú osvetlenie Ly- $\alpha$  veľmi presne, dokonca aj pre voči Slnku sa rýchlo pohybujúce družice (u ktorých dochádza k dopplerovskému skráteniu alebo predĺženiu vlnovej dĺžky Ly- $\alpha$  žiarenia). Ich nevýhodou je vysoká spotreba energie (na vyhrievanie odporového drôtu, spotreba v jednotkách W) a veľké rozmery (štvorkanálový modul na družici PROGNOZ 6 vážil 7 kg a komora pre Ly- $\alpha$  kanál merala 8 cm).

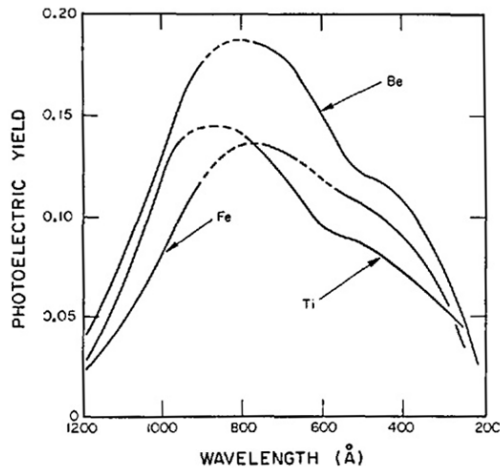
## 1.4 Princíp navrhovaného detektora

### 1.4.1 Fotokatódy

Ako sme už spomenuli, dopad slnečného svetla na kovovú elektródu s určitou pravdepodobnosťou vyvolá vnútorný fotoelektrický jav v elektróde, ktorý, ak je dostatočne početný, je možné citlivou elektronikou detekovať (či už schválne, alebo nechtiac). Pravdepodobnosti fotoefektu pri dopade svetelného kvanta hovoríme *fotoelektrický výťažok*. Závislosti fotoelektrického výťažku na vlnovej dĺžke dopadajúceho žiarenia pre rôzne (prevažne kovové) materiály možno nájsť napríklad v (Samson, 1967, str. 224–244) a (Cairns a Samson, 1966). V grafoch na obrázkoch 1.4 a 1.5 uvádzame závislosti fotoelektrického výťažku na vlnovej dĺžke pre fotokatódy z vybraných bežných kovových materiálov. Podotýkame, že sa všeobecne líšia len málo, s jasným maximom okolo 80 nm vlnovej dĺžky dopadajúceho svetelného kvanta a maximálnou účinnosťou fotoemeisie 10 – 20%.



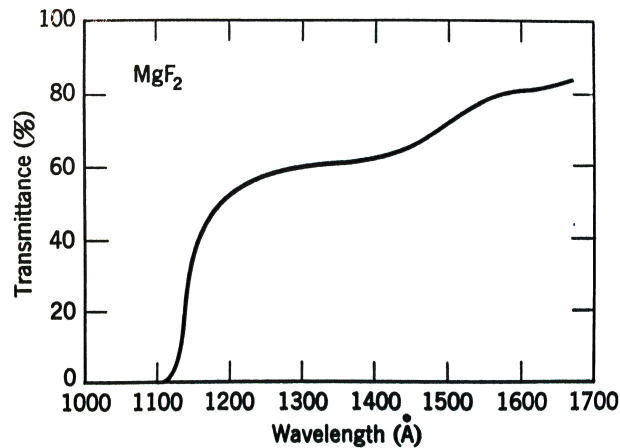
Obr. 1.4: Fotoelektrický výťažok hliníkovej, zinkovej a medenej fotokatódy vo VUV oblasti spektra, prevzaté z Cairns a Samson (1966)



Obr. 1.5: Fotoelektrický výťažok berýliovej, železnej a titánovej fotokatódy vo VUV oblasti spektra, prevzaté z Cairns a Samson (1966)

### 1.4.2 VUV priehľadné materiály

Najpoužívanejšími materiálmi prepúšťajúcimi VUV žiarenie sú LiF, MgF<sub>2</sub>, CaF<sub>2</sub>, SrF<sub>2</sub> a BaF<sub>2</sub>. Zatiaľ čo najlepšiu charakteristiku priepustnosti má LiF, na mnoho aplikácií sa hodí skôr stabilnejší (voči adsorbácii a degradácii povrchu vplyvom žiarenia) MgF<sub>2</sub>, na nízokoteplotné aplikácie potom aj CaF<sub>2</sub>. V grafe na obrázku 1.6 vidno závislosť priepustnosti MgF<sub>2</sub> kryštálu vo VUV oblasti.

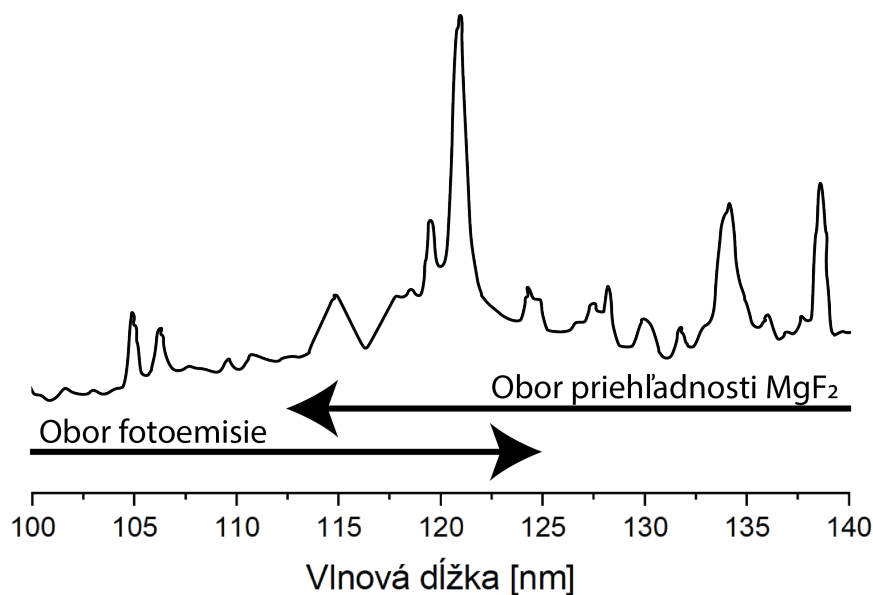


Obr. 1.6: Priepustnosť 1 mm hrubého vylešteného kryštálu MgF<sub>2</sub> vo VUV oblasti, prevzaté zo Samson (1967, str. 180–184).

### 1.4.3 Fotoemisný UV detektor

Jednoduchý (v spektre integrálny) detektor UV žiarenia možno zostaviť spojením kryštalického pre VUV priepustného okna s fotokatódou z vhodného materiálu. Uvažujúc sklíčko z MgF<sub>2</sub> (graf priepustnosti na obrázku 1.6) a hliníkovú fotokatódu (graf výťažku na obrázku 1.4), výsledný detektor bude citlivý na vlnové dĺžky 110 nm až 130 nm. Porovnaním so spektrálnou hustotou žiarenia z grafu

na obrázku 1.3 je jasné, že tento detektor bude citlivý v podstate len na Ly- $\alpha$  žiarenie (121.6 nm), keďže sa jedná a pomerne osamotenú čiaru, ktorá nesie veľkú časť energie okolitého spektra. Porovnanie intervalov ilustruje obrázok 1.7.



Obr. 1.7: Detekčné schopnosti detektora s hliníkovou katódou (na základe kriviek (obrázky 1.6 a 1.4) prevzatých zo Samson (1967, str. 180–184), Cairns a Samson (1966))

Fotoemisný UV detektor vyššie navrhovanej konštrukcie síce poskytne menej informácií, ako napríklad plynová absorpčná komora, no pri oveľa menších rozmeroch, nižšej spotrebe energie a veľmi vysokej rýchlosti merania. Keďže je citlivý práve na oblasť spektra, ktorá je zodpovedná za najdôležitejšiu zložku fotoprúdu, takýto detektor spĺňa požiadavky, ktoré sme na jeho funkčnosť kládli v úvode a má, ako sme spomenuli, potenciál na široké využitie v in-situ kozmických experimentoch, najmä ako doplnenie ostatných meraní.

## 2. Ciele práce

Hlavným cieľom práce je demonštrovať funkčnosť existujúceho návrhu detektora a zistiť jeho základné charakteristiky. Za prínosnú považujeme aj diskusiu využitia tohto prístroja. V bodoch možno naše ciele zhrnúť nasledovne:

1. Vykonať rešerš súčasných metód merania UV, hlavne Lyman alfa, v kozmickom prostredí.
2. Zostaviť detektor vrátane navrhnutých elektronických obvodov.
3. Vykonať overovacie merania jednotlivých častí vo vákuových podmienkach.
4. Otestovať funkciu detektora vo vákuovej komore UV zdrojom.
5. Analyzovať výsledky testov a diskutovať využitie prístroja pre družicové experimenty.

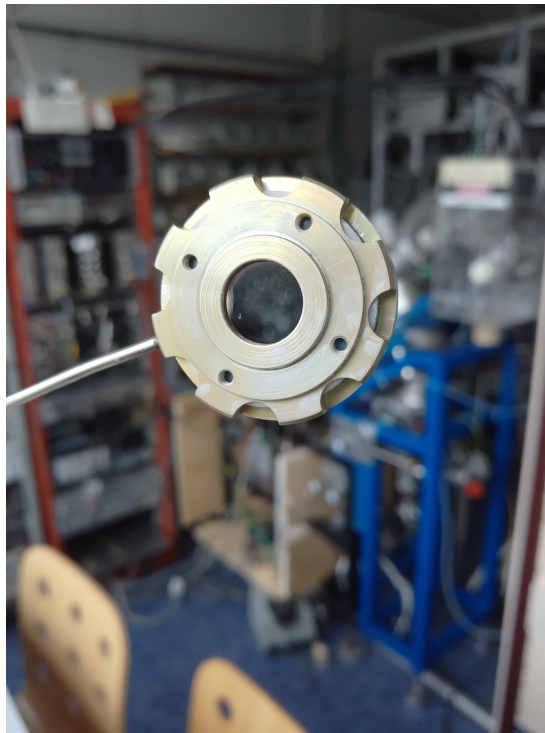
# 3. Laboratórne merania

## 3.1 Konštrukcia prototypu

### 3.1.1 Okno

Vstupné okienko detektora je jeho kľúčový komponent, keďže prevažne práve ono rozhoduje o intenzite detekcie UV fotónov, poťažmo o citlivosti detektora. Dobré optické vlastnosti je potrebné sklbiť s mechanickými vlastnosťami, ktoré umožnia jeho použitie vo vákuu a v kozme.  $MgF_2$  je vhodným materiálom na vstupné okno detektora, keďže, ako vidno v grafe na obrázku 1.6, vyznačuje sa dobrou priepustnosťou v oblasti nad 120 nm. Okrem toho je  $MgF_2$  dobre vákuovo kompatibilný, mechanicky pevný a stabilný.

V prototypu použitým oknom bolo kruhové  $MgF_2$  okno priemeru 12.5 mm a hrúbky 2 mm, viď Edmund opt.: Magnesium Fluoride Window. Na toto okno bola nanosená monovrstva zlata, zosilnená na okrajoch, ktorá zabezpečuje odvod náboja z povrchu okna cez telo detektora a zamedzuje tak jeho nabíjaniu. Túto úpravu zabezpečili pracovníci skupiny tenkých vrstiev KFPP MFF UK. Na obrázku 3.1 vidno pozlátené fluoridové okno vložené v prednom paneli detektora, takto sme ho používali pri niektorých meraniach.



Obr. 3.1: Pozlátené fluoridové okno uchytené v prednom paneli detektora

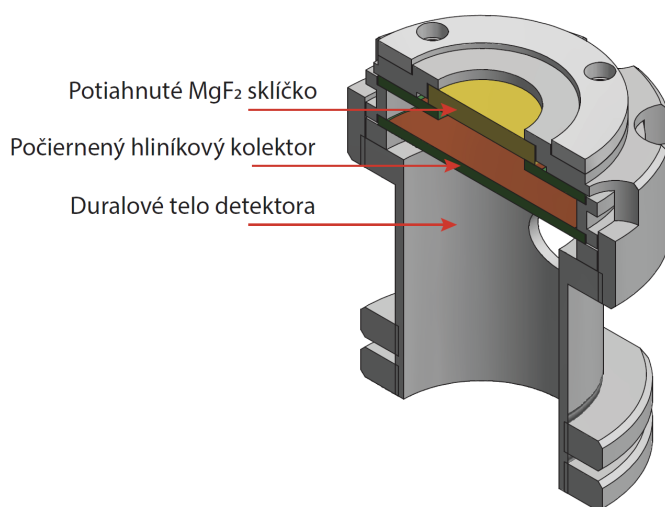
Nachúlостivejšou časťou okna je práve monovrstva zlata, ktorá je mechanicky veľmi citlivá a nevydrží ani dotyk ruky. Veľkou otázkou pred meraním bolo, či a do akej miery odolá vplyvom kozmického prostredia, menovite bombardu vo vesmírnom prostredí prítomnými iónmi a elektrónmi.

### 3.1.2 Kolektor

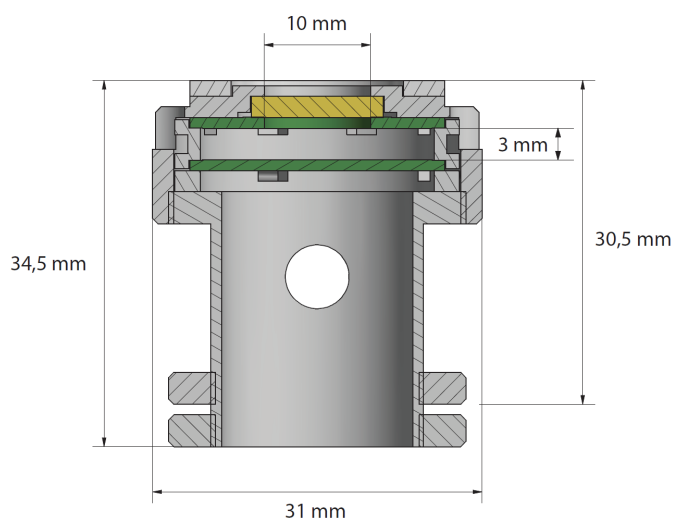
Kolektorom (fotokatódou) prototypu detektora bol 1 mm hrubý uhlíkom počiernený duralový pliešok umiestnený 4 mm pod vstupným  $\text{MgF}_2$  oknom. Hliník bol zvolený ako vhodný materiál, pretože je vákuovo kompatibilný, ľahký a vykazuje pomerne vysoký fotoelektrický výťažok (viď obrázok 1.4).

### 3.1.3 Telo

Samotný detektor, tak, ako bol navrhnutý pracovníkmi skupiny kozmickej fyziky KFPP MFF UK, má približne 3 cm na výšku a vstupný otvor prekrytý  $\text{MgF}_2$ . Ukážky z výkresovej dokumentácie prototypu sú na obrázkoch 3.2 a 3.3.



Obr. 3.2: Náčrt konštrukcie prototypu detektora



Obr. 3.3: Prierez prototypom detektora

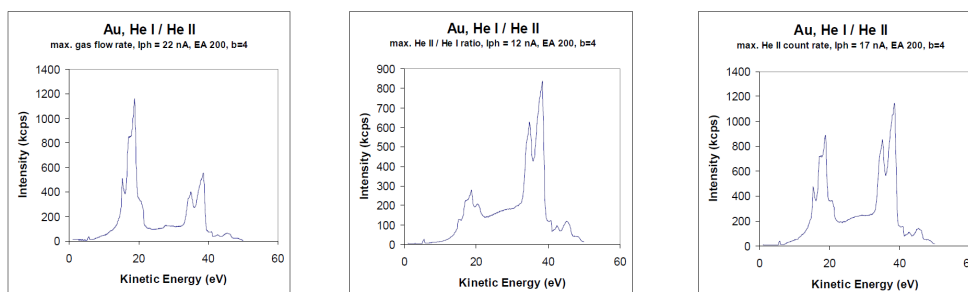
## 3.2 Aparatúra a usporiadanie

### 3.2.1 Komponenty aparatury

#### 3.2.1.1 UV lampa

Ako zdroj UV žiarenia v systéme sme použili diferenciálne čerpanú kapilárovú plynovú UV lampu od firmy *Specs*. Lampa funguje na princípe stáleho výboja v komore, ktorou s malým prúdom preteká plyn. Plyn musí pretekať, pretože komoru s výbojom nemožno (kvôli útlmu žiarenia akoukoľvek prekážkou, hoc aj fluoridovým oknom) oddeliť od vastnej komory aparatury a plyn teda stále uniká do hlavného systému a je čerpaný aj vývevami hlavnej komory. Práve preto je použitý systém diferenciálneho čerpania lampy a úzkej kapiláry s malou vákuovou vodivosťou. Nastavovaním prítoku plynu do lampy teda ladíme dynamickú rovnováhu a môžeme meniť tlak v komore s výbojom, ten potom meriame vákuometrom umiestneným v tej istej komore.

So zmenou tlaku v komore s výbojom sa mení svetelné spektrum výboja (pomerné zastúpenie jednotlivých spektrálnych čiar v integrálnom žiarivom výkone), toto dobre ilustruje trojica grafov prevzatá z manuálu k UV lampe SPECS (2009). Zmenou tlaku v komore s výbojom možno meniť podielne zastúpenie čiar Hélia. Podobný efekt nastáva pre každý plyn, hoc pre zložitejšiu štruktúru v spektre môže byť ťažšie interpretovateľný. Kvalitatívne však do istej miery platí, že pri nižšom tlaku bude k zrážkam atómov dochádzať zriedkavejšie, teda budú poľom medzi zrážkami dlhšie urýchľované a výsledné žiarenie bude energetickejšie. Keďže vstupné okno detektora reprezentuje akýsi frekvenčný filter, podiel prepusteného žiarenia k dopadajúcemu žiareniu sa bude meniť so zmenou spektra.



Obr. 3.4: Spektrá héliového výboja pre rôzne tlaky horiaceho plynu, prevzaté z manuálu k UV lampe SPECS (2009)

#### 3.2.1.2 Elektrónové delo

Pri meraní sme použili elektrónové delo od firmy *Specs*, model *EQ 22/35* ovádané digitálnym kontrolérom *Specs PU EQ 22/35*. Manipulovať zväzkom nízkoenergetických elektrónov je obtiažne, samotná konfigurácia elektród zdola obmedzuje potenciálny spád potrebný pre správne fungovanie zaostrovacej elektroniky. Testovaním nastavenia dela oproti doštičke potrenej luminoforom sme určili najnižšiu energiu elektrónov, pri ktorej bolo možné elektróny zacieliť na vstupné okno valca s rozptylom zhruba zodpovedajúcim veľkosti vstupného okna, aby sme mohli toto vystaviť kontrolovanému bombardu elektrónov. Za túto energiu sme



zvolili 10 eV. Viac o využití elektrónového dela v našom usporiadaní v podkapitole 3.2.4.

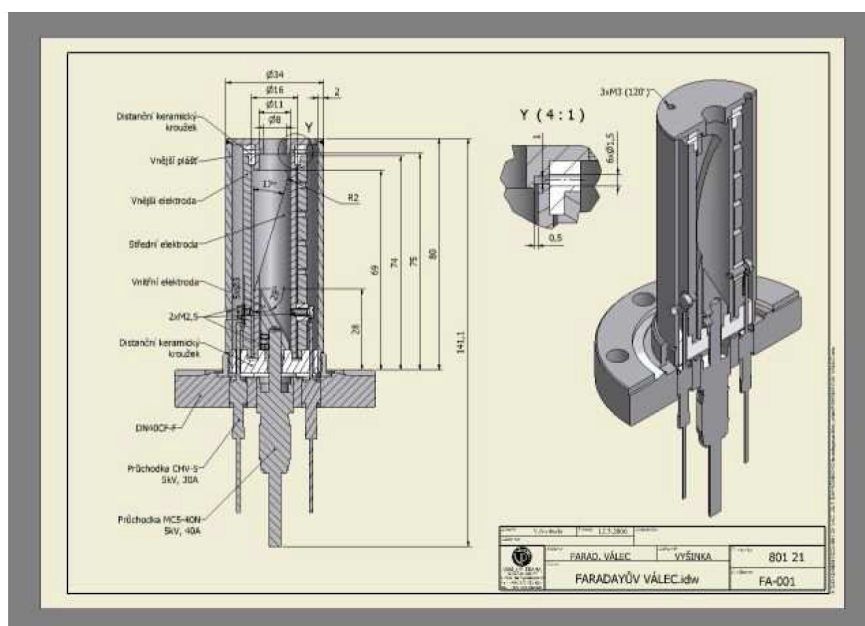
### 3.2.1.3 Iónové delo

Pri meraní sme použili iónové delo od firmy *Leybold – Heraeus*, model *IQ 12/63* ovládané analógovou stanicou *Leybold – Heraeus 86 79 16*. Skúškou oproti doštičke potretej luminoforom sme si overili, že nie je problém ióny požadovanej energie zacieliť na vstupné okno detektora s rozptylom zhruba zodpovedajúcim veľkosti okna. Viac o využití iónového dela v našom usporiadaní v podkapitole 3.2.4.

### 3.2.1.4 Bezmriežkový Faradayov valec

Pre meranie priepustnosti vstupného okna (bez ostatných komponentov detektora, predovšetkým kolektora) sme použili bezmriežkový Faradayov valec vyvinutý v rámci diplomovej práce kolegu Mareka Vyšinka (viď Vyšinka (2008)), jeho náčrt možno vidieť na obrázku 3.5.

Užitočnosť tohto valca spočíva v tom, že geometria jeho elektród nám umožňuje merať fotoprúd z jeho kolektora aj keď valec nemá medzi vstupným otvorom a kolektorom žiadne mriežky, ktoré by znižovali osvit kolektora (rovnako, ako fotokatóda kompletného detektora).

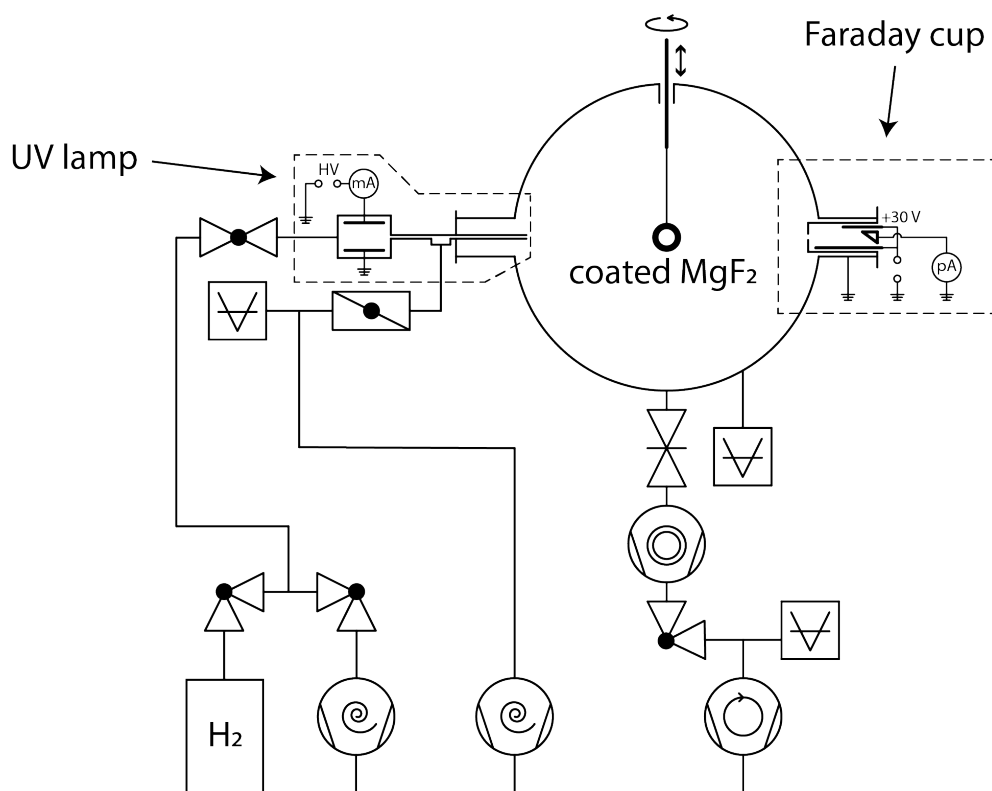


Obr. 3.5: Náčrt bezmriežkového Faradayovho valca, prevzaté z Vyšinka (2008)

## 3.2.2 Priepustnosť okna – experimentálne usporiadanie

Prvým experimentálnym cieľom bolo zmerať reálnu priepustnosť okna pokrytého monovrstvou zlata. Toto meranie sme robili v aparátúre A (viď obrázok 3.6) pozostávajúcej z plynovej UV lampy s diferenciálnym čerpaním (viď podkapitolu 3.2.1.1) a špeciálneho, bezmriežového Faradayovho valca (viď podkapitolu

3.2.1.4) pevne primontovaných na protilaahlých prírubách vákuovej komory. Faradayov valec oproti UV lampe slúžil ako detektor dopadajúceho UV žiarenia. Podobne, ako vo finálnom detektore, z katódy tohto faradayovho valca sú pri dopade UV kvanta s istou nemalou pravdepodobnosťou uvoľnené elektróny, ktoré citlivým ampérmetrom meriame. Kolektor (v našom zapojení katóda) použitého Faradayovho valca bol nerezový, ale ako vidno z podobnosti medzi závislosťami v grafoch na obrázkoch 1.4 a 1.5, toto nemôže mať veľký vplyv na meranie priepustnosti okna.



Obr. 3.6: Schéma vákuovej aparatury A

Okno sme umiestnili do predného panela tela detektora a tento uchytli na rotačný držiak tak, že ho bolo možné okamžite a bez prerušenia prevádzky vákuovej komory a jej súčastí dostať do prúdu svetla medzi lampou a Faradayovým valcom, mimo neho alebo prúd úplne zatieniť a merať hodnotu pozadia signálu detektora. Schému aparatury A možno vidieť na obrázku 3.6.

### 3.2.3 Meranie uhlovej závislosti citlivosti – experimentálne usporiadanie

Naším cieľom bolo určiť zorné pole detektora (angl. FOV - *field of view*). V aparatury A, no s dvomi súčasnými úpravami oproti meraniu popísanému vyššie:

- s rotačným držiakom použitým na nastavenie uhlu natočenia detektora od UV lampy a
- s celým zostaveným detektorom.

V tomto prípade sme už nemali k dispozícii údaj o signále na kolektore neprekrytým oknom, v tomto prípade sme teda nedokázali merať priepustnosť okna, ale skutočne sme merali iba závislosť intenzity signálu na uhle odklonu detektora od osi líča.

### 3.2.4 Simulácia starnutia – experimentálne usporiadanie

Najväčšie riziko pre dlhodobé in-situ fungovanie detektora predstavuje vystavenie bombardu častíc, napríklad zo slnečného vetra (v prípade orientácie detektora smerom na Slnko). Problémom môže byť jednak degradácia povrchu fluoridového okna, jednak degradácia zlatej vrstvy a jednak možnosť permeácie nabitých častíc oknom, ktorá by meranie úplne znehodnotila.

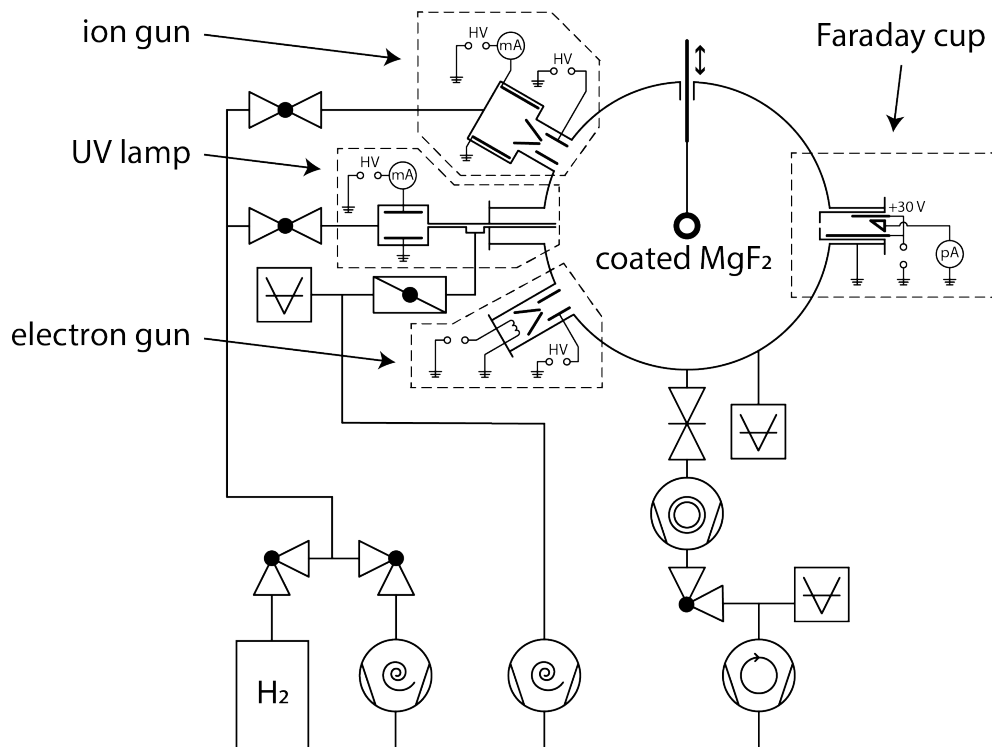
Typické parametre slnečného vetra v blízkosti Zeme sú:

- približne  $1 \text{ cm}^{-3}$  protónov aj elektrónov v kvazineutrálnom prostredí a
- rýchlosť približne  $500 \text{ km s}^{-1}$

Pri ploche okna približne  $1 \text{ cm}^2$  nám tieto čísla udávajú približný prúd elektrónov aj iónov  $1 \times 10^{-11} \text{ A}$  pri energii protónov  $1.3 \text{ keV}$  a energii elektrónov  $0.7 \text{ eV}$ . Rovnaký náboj prenesieme na povrch fluoridového okna pri prúde  $1 \times 10^{-5} \text{ A}$  za  $30 \text{ s}$ . Ostrelovať okno vodíkovými kationmi s energiou  $1.3 \text{ keV}$  nie je technický problém (viď podkapitulu 3.2.1.3), vyrobiť však rovnobežný zväzok elektrónov s nízkou energiou je obtiažne (ako spomínamie v podkapitole 3.2.1.2). Nami použité elektrónové delo dokáže produkovať dostatočne zaostrené elektróny s energiou  $10 \text{ eV}$ . Za ekvivalent ročného pobytu na obežnej dráhe s natočením smerom na Slnko teda považujeme súčasnú  $30 \text{ s}$  expozíciu okna voči:

- $1 \times 10^{-5} \text{ A}$  prúdu protónov s energiou  $1.3 \text{ keV}$ ,
- $1 \times 10^{-5} \text{ A}$  prúdu elektrónov s energiou  $10 \text{ eV}$  a
- osvitu VUV (UV lampou) s intenzitou rovnakou, ako pri samotnom meraní

Aby sme mohli striedavo vystavovať okno bombardu vyššie popísaným prúdom častíc, zakomponovali sme iónové delo, UV lampu, elektrónové delo a Faradayov valec do jednej aparatúry s oknom detektora (pri tomto meraní sme teda opäť nepoužili celý detektor, iba jeho vstupné okno) a prúd sme merali samostatným bezmriežkovým Faradayovým valcom. Aparatúra použitá pri tomto meraní (označená ako aparatúra B) je znázornená na obrázku 3.7.



Obr. 3.7: Schéma vákuovej aparatúry B

## 3.3 Výsledky merania

### 3.3.1 Priepustnosť okna

Meranie prebiehalo postupne pre rôzne tlaky rôznych plynov vo výboji UV lampy. Pre každý tlak jedného plynu sme bezprostredne po sebe zmerali prúd  $I_{ref}$  fotoelektrónov na Faradayovom valci v komore bez  $MgF_2$  okna v ceste, prúd  $I_0$  zatieneného valca (pozadie) a prúd  $I_{window}$  s oknom v ceste. Potom sme upravili tlak plynu v lampe na novú hodnotu, počkali na ustálenie prúdu a opäť odmerali hodnoty  $I_{ref}$ ,  $I_0$  a  $I_{window}$ . Premerali sme celý obor tlakov, pri ktorých v lampe horel stabilný výboj. Meranie sme vykonali s vodíkom a argónom ako pracovnými plynmi lampy. Hodnota  $I_{ref}$  je mierou celkového VUV vyžarovacieho výkonu lampy konvolovaného s fotoelektrickým výťažkom (nerezového) kolektora použitého Faradayovho valca.

Je jasné, že priepustnosť okna nebude všeobecne pre rôzne plyny a rôzne tlaky plynu v lampe rovnaká. Okno prepúšťa len úzke okno vlnových dĺžok. Pri pomeňme, že spektrum žiarenia UV lampy je funkciou aj tlaku pracovného plynu, viď podkapitulu 3.2.1.1, nevyhnutne sa teda musí (integrálna) priepustnosť so zmenou tlaku meniť. Našou ambíciou nie je určiť, ako sa bude priepustnosť meniť pri zmene parametrov spektra, cheme len určiť obor hodnôt, ktoré môžeme pri praktickom použití na družici očakávať. V prípade použitia pri družicovom meraní bude presná kalibrácia priebežne vykonávaná v kombinácii s ostatnými meracími zariadeniami citlivými na fotoprúd priamo in-situ, ako opisujeme v podkapitole 1.1.

Ďalším dôležitým faktorom je to, že prúd  $I_{ref}$  z nezakrytého valca a prúd  $I_{window}$  sú funkciami integrálov spektrálnej hustoty vyžarovania cez rôzny inter-

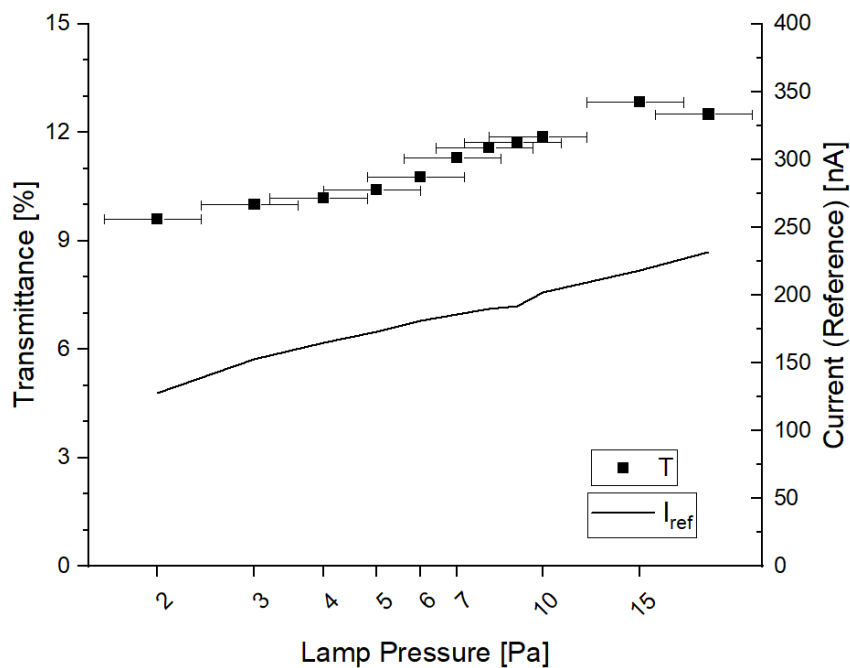
val. Keď je valec nezakrytý, meriame skalárny súčin závislostí spektra žiarenia (na obrázku 1.3) a fotoelektrického výťažku ako funkcie energie dopadajúceho fotónu (graf na obrázku 1.4), zatiaľ čo  $\text{MgF}_2$  okno ďalej vstupuje do súčinu tak, ako vidno v grafe priepustnosti  $\text{MgF}_2$  (graf na obrázku 1.6). Predstavu o možnostiach detektora dáva graf ukazujúci prekryv oborov fotoelektrického výťažku a priepustnosti (graf na obrázku 1.7). Z toho istého grafu vidieť, že možno očakávať, že takto zostavený detektor bude veľmi citlivý na silnú čiaru  $\text{Ly}-\alpha$ .

Pre každý bod zodpovedajúci druhu a tlaku plynu určíme priepustnosť vzťahom

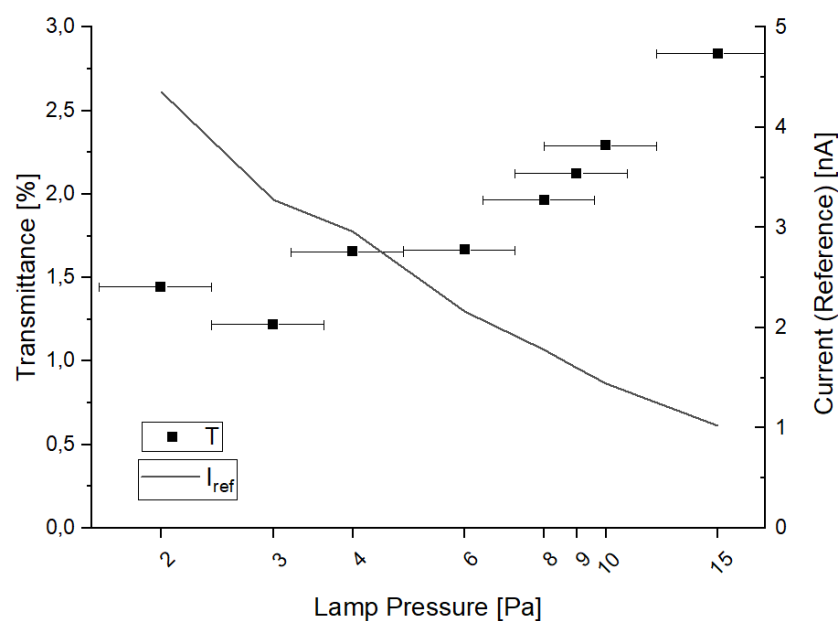
$$T = \frac{I_{\text{window}} - I_0}{I_{\text{ref}} - I_0}, \quad (3.1)$$

kde priepustnosť sme označili  $T$ . Očakávame, že priepustnosť bude zásadne iná pre vodík a pre argón (v argóne sa nevyskytuje čiara  $\text{Ly}-\alpha$ ), no bude len slabou funkciou tlaku horiaceho plynu v lampe.

Pri zmene tlaku sme fixovali prúd pretekajúci výbojom v lampe, vďaka čomu sa ani celkový ohmický výkon lampy rádovo nemenil (zmenu vidno v grafoch prúdov  $I_{\text{ref}}$  na obrázkoch 3.8 a 3.9). Namerané krivky  $I_{\text{ref}}$  a  $T$  pre vodík a argón vidno v grafoch na obrázkoch 3.8 a 3.9 respektíve. X-ové chybové úsečky pochádzajú zo značnej neistoty v určení tlaku plynu.



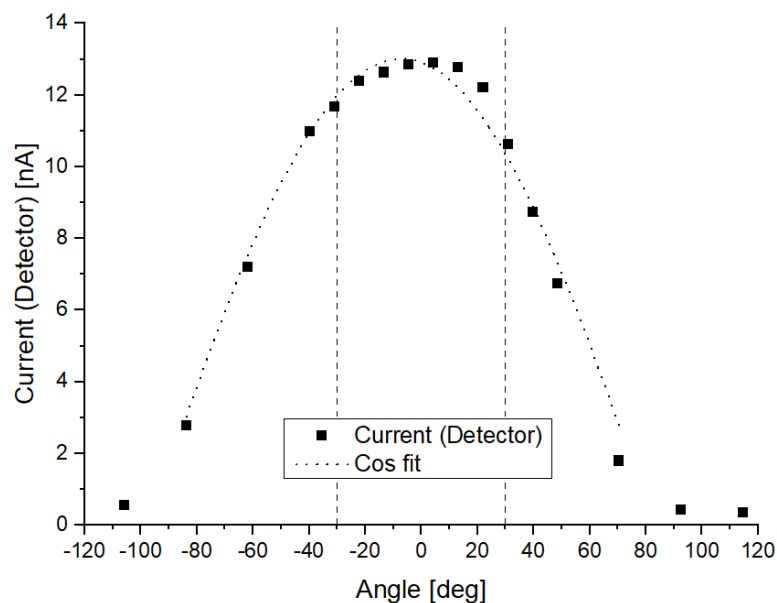
Obr. 3.8: Namerné hodnoty priepustnosti  $T$  okna z  $\text{MgF}_2$  pre vodíkový výboj



Obr. 3.9: Namerné hodnoty priepustnosti  $T$  okna z  $MgF_2$  pre argónový výboj

### 3.3.2 Meranie uhlovej závislosti citlivosti

Výsledky merania uhlovej závislosti intenzity signálu (fotoprúdu) pri arbitrárne zvolenom tlaku  $H_2$  a prúde sú znázornené v grafe na obrázku 3.10.



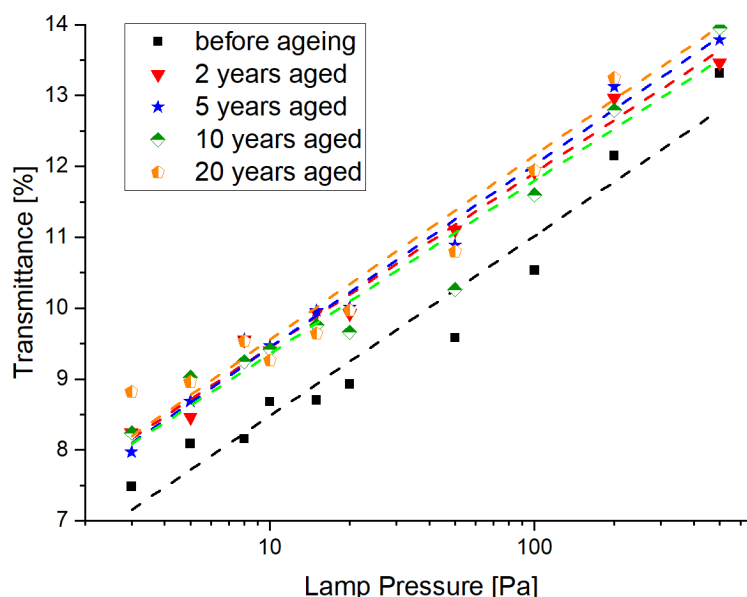
Obr. 3.10: Uhlová závislosť intenzity signálu

Výsledkom merania je, že detektor vykazuje v podstate konštantnú citlivosť v intervale  $-30^\circ$  až  $30^\circ$ . Keďže vstupný otvor detektora je menší, než detekčná

plocha kolektora, pre istý obor uhlov padne v podstate celý priemet vstupného otvoru na kolektor, takmer konštantná citlivosť v istom obore uhlov je očakávateľná. Uvažujúc rotačnú symetriu detektora môžeme prehlásiť, že ideálne zorné pole deketora je rotačne symetrických 30 stupňov.

### 3.3.3 Simulácia starnutia

Meranie prebehlo v aparátúre B (schéma na obrázku 3.7) s vodíkovým výbojom, pri striedaní fázy merania prúdov  $I_{ref}$  (fotoprúd z neprekytej fotokatódy),  $I_0$  (prúd ze neosvietenej fotokatódy),  $I_{window}$  (fotoprúd z fotokatódy prekrytej oknom) a fázy osvetlenia elektrónovým a iónovým delom popísanej vyššie. Celkovo sme simulovali starnutie o 1, 2, 5, 10 a 20 rokov na tej iste vzorke (teda dávka žiarenia zodpovedala postupne 1, 1, 3, 5, 10 rokom). Výsledky tohto merania vidno v grafe na obrázku 3.11.



Obr. 3.11: Priepustnosť  $MgF_2$  okna pred a po starnutí (vodíkový výboj)

Z výsledkov v grafe na obrázku 3.11 je vidieť, že vplyv malo len prvotné ožiarenie, všetky ďalšie závislosti sa vrámci neistoty merania zhodujú so závislosťou nameranou po prvom ožiarení. Priepustnosť sa po bombarde zlepšila nezávisle na tlaku plynu v lampe približne o 1 percentuálny bod, teda asi o 10%. Je pozitívnym výsledkom, že okno ostalo veľmi dobre (dokonca ešte lepšie) použiteľné aj po bombarde. Drobnú zmenu priepustnosti pripisujeme dočisteniu povrchu od organických nečistôt, od ktorých sme sklíčko mechanicky vyčistiť nemohli kvôli veľmi jemnému povrchu (monovrstve zlata). Či ostala práve táto vrstva zlata nepoškodená nevieme, priepustnosť sa nezhoršila a voľným okom sme zmenu okna nepozorovali.

## 4. Diskusia výsledkov a využitie

### 4.1 Ly- $\alpha$

Výrazne vyššia priepustnosť MgF<sub>2</sub> okna pri osvite vodíkovým výbojom oproti argónovému výboju (8–13% oproti 1–3% resp.) naznačuje, že okno prepúšťa práve Ly- $\alpha$  čiaru spektra a to s pomerne vysokou intenzitou. Toto je v súlade s očakávaním založeným na charakteristikách použitých materiálov (viď obrázok 1.7).

### 4.2 Starnutie a odolnosť

Laboratórna simulácia starnutia vstupného okna vplyvom pomienok panujúcich v slnečnom vetre ukazuje, že detektor vydrží pracovať v slnečnom vetre mnoho rokov. Pri tejto simulácii sme sa dopustili nepresnosti, keď sme okno bombardovali elektrónmi s oveľa vyššou energiou, než aké sa bežne v slnečnom vetre vyskytujú, meranie má však len informatívny charakter a nie je dôvod predpokladať, že by pomalšie elektróny spôsobili výraznejšiu degradáciu povrchu, než elektróny s vysokou energiou.

Na overenie, či nabité častice nemôžu prestupovať vstupným sklom, sme nevykonali žiadne podrobné meranie, pri bombarde nabitými časticami (vrámci merania popísaného v podkapitole 3.2.4) sme však nepozorovali, že by sa signál Faradayovho valca pri spustení elektrónového a iónového dela (a pri sústavnom chode UV lampy) zmenil, na úrovni presnosti nášho merania nám toto zistenie úplne stačí. Opäť, ak aj k zaujatiu vplyvom nabitých častíc dochádza, v kozme bude oveľa menšie, než naše v aparátúre (v aparátúre bolo nepozorovateľné), keďže sme kvôli zrýchlenému starnutiu okna vystavovali toku častíc oveľa väčšiemu, než aký je prítomný v okolí Zeme.

### 4.3 Možné ďalšie pokračovanie

Pre určenie parametrov elektorniky (zosilňovač, zbernica) doplňujúcej merací prístroj na družici, je podstatné vedieť, aké hodnoty fotoprúdu z kolektora detektora očakávame. Pre praktické použitie stačí poznať rád intenzity signálu, aby sme ho zistili, potrebujeme poznať s podobnou presnosťou žiarivý tok UV na detektore a porovnať ho so žiarivým tokom UV zo Slnka na úrovni Zeme (požajmo so žiarivým tokom UV v oblasti, v ktorej chceme detektor používať).

Podľa vzťahu

$$\Phi = \frac{I_{ref}}{e\eta}, \quad (4.1)$$

kde  $\Phi$  je tok fotónov (v [s<sup>-1</sup>]),  $I_{ref}$  je fotoprúd z kolektora detektora meraný bez okna v ceste,  $e$  je elementárny náboj a  $\eta$  je fotoelektrický výťažok, možno približne určiť tok fotónov  $\Phi$  z UV lampy na  $2 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$ . Pritom sme využili, že fotoelektrický výťažok železa pre fotóny v okolí čiary Ly- $\alpha$  je približne 5% (viď 1.5) a typické detekované prúdy  $I_{ref}$  boli približne 150 nA (viď podkapitolu 3.3).



Spolu s plochou vstupného otvoru použitého valca približne  $50 \text{ mm}^2$  toto udáva plošný tok fotónov približne  $4 \times 10^{18} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ .

Podľa Woods a kol. (2004) je typický plošný výkon prenášaný Ly- $\alpha$  zo Slnka približne  $1 \times 10^{-2} \text{ W m}^{-2}$ . Energia jedného Ly- $\alpha$  kvanta je približne 10 eV, teda približne  $1.6 \times 10^{-18} \text{ J}$ . V Slnčnom žiarení v okolí Zeme teda panuje tok Ly- $\alpha$  fotónov približne  $6 \times 10^{15} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ . Bez spektroskopu nie je možné spoľahlivo určiť, aká časť fotónov generujúcich nami meraný prúd sú práve Ly- $\alpha$  fotóny, no ak uvážime priepustnosť 10 %, plochu vstupného okna  $1 \text{ cm}^2$  a fotoelektrický výtazok hliníka 3 %, môžeme v kozme očakávať hodnotu fotoprúdu (spôsobenú len Ly- $\alpha$  fotónmi) približne 0.3 nA, čo je dobre merateľná hodnota.

## 4.4 Využitie

Naše merania dokumentujú využiteľnosť detektora na približné, no priebežné a veľmi rýchle meranie VUV osvitú, predovšetkým čiary Ly- $\alpha$ . Okno vykazuje zhruba 10 % priepustnosť žiarenia vodíkového výboja a možno teda očakávať podobnú priepustnosť slnečného VUV. Detektor je pripravený na využitie v kozmických in-situ meraniach.

## 5. Záver

Vykonalí sme rešerš súčasných metód merania VUV žiarenia v kozme a diskutovali sme prínos nového prístroja pre budúce experimenty.

Úspešne sme zostavili prototyp detektora vrátane elektronických súčastí a úspešne sme ho pripojili na meracie prístroje.

Na detektore sme vykonali overovacie merania a overili sme jeho vákuovú kompatibilitu vo vákuovej aparátúre.

Meraním fotoprúdu z kolektora detektora vo vákuovej aparátúre po osvite UV lampou sme demonštrovali jeho základnú funkčnosť.

Analyzovali sme priepustnosť vstupného okna detektora, určili sme zorné pole detektora na približne  $30^\circ$  a vylúčili sme vplyv okolitého ionizovaného prostredia na starnutie detektora. Na základe charakteristík detektora sme diskutovali jeho možné budúce využitie.

# Zoznam použitej literatúry

- BERTAUX, J. L. AND OTHERS (1985). Characteristics of the local interstellar hydrogen determined from PROGNOZ 5 and 6 interplanetary Lyman-alpha line profile measurements with hydrogen absorption cells. *Astronomy and Astrophysics*, **150**, 1–20. ISSN 0004–6361. doi: 10.1016/j.asr.2015.10.012.
- CAIRNS, R. B. a SAMSON, J. A. R. (1966). Metal photocathodes as secondary standards for absolute intensity measurements in the vacuum ultraviolet. *J. Opt. Soc. Am.*, **56**, 1568–1573. doi: 10.1364/JOSA.56.001568.
- DETWILER, C. R. AND OTHERS (1958). The intensity distribution in ultraviolet solar spectrum. *IGY Satellite Report*.
- EDMUND OPTICS WORLDWIDE. 12.5 mm diameter uncoated, magnesium fluoride window. <https://www.edmundoptics.eu/p/12.5mm-diameter-uncoated-magnesium-fluoride-window/18805/>. Citácia: 2018-09-09.
- KENNETH MEES, C. E. (1931). Photographic plates for use in spectroscopy and astronomy. *J. Opt. Soc. Am.*, **21**, 753–775.
- KOLEKTÍV SPECS (2009). *Manual für UVS 10-35-v2.4*. SPECS GmbH - Surface Analysis and Computer Technology Voltastrasse 5 D-13355 Berlin, Germany.
- KOLEKTÍV WIKIMEDIA PROJECT. File: Solar spectrum. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar\\_spectrum\\_en.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_spectrum_en.svg). Citácia: 2018-12-18, použité v súlade s Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
- MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ FAKULTA UNIVERZITY KARLOVY A SPACE RESEARCH INSTITUTE OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES (2013). Experiment BMSW (Spektr-R). [http://aurora.troja.mff.cuni.cz/spektr-r/project/quicklook\\_analogue.php](http://aurora.troja.mff.cuni.cz/spektr-r/project/quicklook_analogue.php). Citácia: 2018-12-18.
- NEMECEK, Z., SAFRANKOVA, J., LOPEZ, R., DUSIK, S., L., N., PRECH, L., SIMUNEK, J. a SHUE, J.-H. (2016). Solar cycle variations of magnetopause locations. *Adv. Space Res.*, **58(2)**, 240–248. doi: 10.1016/j.asr.2015.10.012.
- SAMSON, J. A. (1967). *Techniques of Vacuum Ultraviolet Spectroscopy*. John Wiley & Sons.
- VYŠINKA, M. (2008). Studium záchytu iontů a iontová emise z prachových zrn. Master's thesis, Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova.
- WOODS, T. N., EPARVIER, F. G., FONTENLA, J., HARDER, J., KOPP, G., MCCLINTOCK, W. E., ROTTMAN, G., SMILEY, B. a SNOW, M. (2004). Solar irradiance variability during the october 2003 solar storm period. *Geophysical Research Letters*, **31(10)**. doi: 10.1029/2004GL019571. URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2004GL019571>.

ŠAFRÁNKOVÁ, J., NĚMEČEK, Z., PŘECH, L., ZASTENKER, G., ČERMÁK, I.,  
CHESALIN, L., KOMÁREK, A., VAVERKA, J., BERÁNEK, M., PAVLŮ, J.  
A KOL. (2013). Fast solar wind monitor (bmsw): Description and first results.  
*Space Science Reviews*, **175**(1-4), 165–182.

# Zoznam obrázkov

1.1	Parametre slnečného vetra merané experimentom BMSW, ukážka dát prevzatá z MFF & SRI of RAoS (2013) . . . . .	2
1.2	Spektrálna hustota slnečného žiarenia, prevzaté z Wikipedia: Solar spectrum . . . . .	3
1.3	Spektrálna hustota slnečného žiarenia vo VUV oblasti spektra, prevzaté z Detwiler, C. R. and others (1958) . . . . .	5
1.4	Fotoelektrický výťažok hliníkovej, zinkovej a medenej fotokatódy vo VUV oblasti spektra, prevzaté z Cairns a Samson (1966) . . . . .	6
1.5	Fotoelektrický výťažok berýliovej, železnej a titánovej fotokatódy vo VUV oblasti spektra, prevzaté z Cairns a Samson (1966) . . . . .	7
1.6	Priepustnosť 1 mm hrubého vylešteného kryštálu $MgF_2$ vo VUV oblasti, prevzaté zo Samson (1967, str. 180–184). . . . .	7
1.7	Detekčné schopnosti detektora s hliníkovou katódou (na základe kriviek (obrázky 1.6 a 1.4) prevzatých zo Samson (1967, str. 180–184), Cairns a Samson (1966)) . . . . .	8
3.1	Pozlátené fluoridové okno uchytené v prednom paneli detektora . . . . .	10
3.2	Náčrt konštrukcie prototypu detektora . . . . .	11
3.3	Prierez prototypom detektora . . . . .	11
3.4	Spektrá héliového výboja pre rôzne tlaky horiaceho plynu, prevzaté z manuálu k UV lampe SPECS (2009) . . . . .	12
3.5	Náčrt bezmriežkového Faradayovho valca, prevzaté z Vyšinka (2008) . . . . .	13
3.6	Schéma vákuovej aparatury A . . . . .	14
3.7	Schéma vákuovej aparatury B . . . . .	16
3.8	Namerné hodnoty priepustnosti T okna z $MgF_2$ pre vodíkový výboj . . . . .	17
3.9	Namerné hodnoty priepustnosti T okna z $MgF_2$ pre argónový výboj . . . . .	18
3.10	Uhlová závislosť intenzity signálu . . . . .	18
3.11	Priepustnosť $MgF_2$ okna pred a po starnutí (vodíkový výboj) . . . . .	19