MASARYKOVA UNIVERZITA Přírodovědecká fakulta Ústav fyzikální elektroniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Časově rozlišená spektrální diagnostika dopadajícího slunečního záření

Jaroslav Cimerman

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Petr Synek, Ph.D.

2016

Bibliografický záznam

Autor:	Jaroslav Cimerman Přírodovědecká fakulta, Masarykova Univerzita Ústav fyzikální elektroniky	
Název práce:	Časově rozlišená spektrální diagnostika dopadajícího slunečního záření	
Studijní program:	Fyzika	
Studijní obor:	Astrofyzika	
Vedoucí práce:	Mgr. Petr Synek, Ph.D.	
Akademický rok:	2015/2016	
Počet stran:	54	
Klíčová slova:	Rayleighův rozptyl, Mieův rozptyl, Slunce, Spektrum	

Bibliographic Entry

Author:	Jaroslav Cimerman	
	Faculty of Science, Masaryk University	
	Department of Physical Electronics	
Title of Thesis:	Time-resolved spectral diagnostics of solar radiation	
Degree Programme:	Physics	
Field of Study:	Astrophysics	
Supervisor:	Mgr. Petr Synek, Ph.D.	
Academic Year:	2015/2016	
Number of Pages:	54	
Keywords:	Rayleigh Scattering, Mie Scattering, Sun, Spectrum	

Rád bych poděkoval Filipu Hrochovi za zapůjčení dalekohledu, Hvězdárně a planetáriu města Brna za prostory k měření, Aničce Juráňové, která kvůli mně musela vstávat v brzkých ranních hodinách, svojí rodině, která mě vždy podporovala, ale hlavně svému vedoucímu, který nade mnou nezlomil hůl, když už vše vypadalo bledě.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Brně dne 19.5.2016

Jaroslav Cimerman

Abstrakt: Cílem této práce je zjistit, jak se mění sluneční spektrum a spektrum oblohy během dne. Záření procházející různou drahou přes atmosféru vykazuje změny, na které jsem se zde zaměřil. U změny spektra jsem se soustředil na vliv Mieova a Rayleighova rozptylu. Bylo naměřeno velké množství dat, z nichž jsme se pokusili vybrat nejrelevantnější a zpracovat je do srozumitelné formy. Byla ukázána závislost spekter Slunce a oblohy v rámci jednoho dne a zároveň byl ukázán vliv rozptylu na tato spektra. Zároveň nebyla nalezena korelace mezi lokální vzdušnou vlhkostí a absorpčním pásem vody ve spektru.

Klíčová slova: Rayleighův rozptyl, Mieův roptyl, Slunce, Spektrum

Abstract: The aim of these thesis is to find out how spectrum of the Sun and sky is changed during the day. Radiation is modified by atmotphere. I focused on the infuence of Mie and Rayleig scattering. We picked the most relevant data from our messuring and we process them into understandable form. We showed the dependence of the spectra of the Sun and the sky in one day and at the same time we showed the influence of scattering on the spectrum. At the same time there was no correlation between the local humidity and water absorption band in the spectrum.

Keywords: Rayleigh Scattering, Mie Scattering, Sun, Spectrum



MASARYKOVA UNIVERZITA Přírodovědecká fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Akademický rok: 2015/2016

Ústav: Ústav fyzikální elektroniky

Fyzika

Student: Jaroslav Cimerman

Program:

Obor: Astrofyzika

Ředitel *Ústavu fyzikální elektroniky* PřF MU Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu MU určuje bakalářskou práci s tématem:

Téma práce: Časově rozlišená spektrální diagnostika dopadajícího slunečního záření

Téma práce anglicky: Time-resolved spectral diagnostics of solar radiation

Oficiální zadání:

Spektum dopadajícího slunečního záření se proměňuje v závislosti na několika faktorech. Některé z nich jako například množství vlhkosti v ovzduší či počet prachových částic mohou v průběhu dne variovat a lze také očekávat, že se bude měnit v průběhu roku dle aktuálního počasí. Cílem práce je provést a vyhodnotit několik měření v průběhu několika dnů v roce.

Jazyk závěrečné práce: CESTINA

Vedoucí práce: Mgr. Petr Synek, Ph.D.

Konzultant:

Datum zadání práce: 1. 9. 2015

V Brně dne:

27. 11. 2015

Mgr. Filip Hroch, Ph.D.

Souhlasím se zadáním (podpis, datum): 6. 1. 2016

Jaroslav Cimerman student

6

Mgr. Petr Synek, Ph.D. vedoucí práce

prof. RNDr. Mirko Černák, CSc. ředítel Ústavu fyzikální elektroniky

Obsah

1	Úvo	d		9				
2	Roz 2.1 2.2	ptyl sv Raylei Mieův	z ětla ghův rozptyl	10 10 12				
$3 \mathrm{Sp}$		ktrum Slunce 14						
	3.1	Záření	černého tělesa	14				
	3.2	Fraunh	noferovy čáry	14				
4	Pos	tup mè	éření a měřící aparatura	17				
	4.1	Daleko	bhled	17				
	4.2	Montá	že	18				
		4.2.1	Montáž azimutální	19				
		4.2.2	Montáž paralaktická	19				
	4.3	Optick	é vlákno	20				
		4.3.1	Index lomu	20				
		4.3.2	Totální odraz	20				
	4.4	Spektr	ometr	21				
		4.4.1	Monochromátor	21				
		4.4.2	Sekvenční spektrometry	22				
		4.4.3	Simultánní spektrometry	22				
	4.5	Mnou	použitý systém	22				
		4.5.1	Dalekohled	22				
		4.5.2	Sluneční filtr	23				
		4.5.3	Spektrometr	24				
			÷					

5 Kalibrační měření			26		
	5.1	Deuter	riová lampa	26	
	5.2	Haloge	enová lampa	27	
6	Vlastní měření				
	6.1	Zprace	ování výsledných spekter	31	
	6.2	Slunce		31	
		6.2.1	Normování přes integrální dobu	32	
		6.2.2	Normování přes kalibrační funkci	36	
6.3 Spektrum oblohy		rum oblohy	36		
		6.3.1	Normování na místo ve spektru	39	
		6.3.2	Normování přes kalibrační funkci	44	
		6.3.3	Měření vlhkosti vzduchu	50	
7	Záv	ěr		51	
Li	terat	ura		53	

Kapitola 1 Úvod

Spektrum dopadajícího záření měřeného na Zemi se liší od toho měřeného z vesmíru. Záření totiž musí projít atmosférou, kde se láme, absorbuje se a rozptyluje na jejích částicích. Mění se dráha, kterou musí urazit, a to podle směru pozorování. Slunce se během dne nachází v různé výšce nad obzorem a i vzdušná hmota se během dne mění. Díky těmto aspektům spektrum ať už Slunce nebo oblohy samotné nebude vždy stejné. V mé práci zkoumám spektra Slunce v různých denních dobách. Stejně tak zkoumám i spektrum oblohy a to ve vybraných nejzajímavějších místech. Jako hlavním kritériem stojícím za změnu spektra beru rozptyl a to hlavně rozptyl Mieův a Rayleighův. [2] [3] [4]

Kapitola 2 Rozptyl světla

Rozptylem světla rozumíme jev, kdy se záření dopadající na částici či nějaké médium odkloní od svého původního směru. Ve fyzice známe několik druhů rozptylu; Tyndallův rozptyl, který vzniká, když světlo prochází přes prostředí tvořeného mikroskopickými částicemi a paprsky světla se při bočním pozorování stávají viditelnými. Brillouinův rozptyl vzniká interakcí záření a akustických vln v pevných látkách nebo kapalině, kdy dochází ke změně vlnové délky záření. Ramanův rozptyl vzniká mezi interakcí fotonů dopadajícího světla a rotačními stavy atomů a molekul. I zde se mění vlnová délka dopadajícího světla. V atmosféře se ale nejvíce projevují jiné dva rozptyly; Mieův rozptyl a jeho speciální případ rozptyl Rayleghův, a právě proto se jimi budeme zabývat.

2.1 Rayleighův rozptyl

Rayleighův rozptyl se uplatňuje u částic, které jsou menší než je vlnová délka rozptylujícího se světla. Vlnová délka viditelného záření je v řádech stovek nanometrů a velikost částic, na kterých je právě tento rozptyl uplatněn je do velikosti 0,1 nm. Intenzita rozptýleného světla je silně závislá na vlnové délce světla, přesněji nepřímo úměrně čtvrté mocnině vlnové délky. Koeficienty uváděné v literatuře o atmosférickém rozptylu jsou označovány řeckým písmenem β

$$\beta_R^s(h,\lambda) = \frac{8\pi^3 (n^2 - 1)^2}{3N\lambda^4} e^{-\frac{h}{H_R}},$$
(2.1)

kde index s označuje rozptyl (scattering), R zase Rayleighyho rozptyl (pro rozlišení tohoto koeficientu od Mieových rozptylových koeficientů), h označuje výšku, λ je vlnová délka světla, N je molekulární hustota u hladiny moře, n je index

lomu vzduchu, a H_R je výšková škála. Jak je z této rovnice vidět, světlo s krátkou vlnovou délkou bude mít koeficient β větší než světlo s dlouhou vlnovou délkou, což vysvětluje modrou barvu oblohy přes den. Jak světlo prostupuje atmosférou, je modré světlo více a více rozptylováno směrem k pozorovateli. Při východu nebo západu slunce je ale tloušťka atmosféry, kudy musí světlo projít, značně delší a většina modrého světla je rozptýlena pryč, zatímco světlo červené, které se tak moc nerozptyluje zůstává. Proto se obloha při východu a západu Slunce u obzoru jeví červeno-oranžová (někdy fialová až lehce zelená).



Obrázek 2.1: Rozdíl kdy je Slunce v zenitu a kdy u obzoru (při západu nebo východu). [6]

Intenzita rozptýleného světla Rayleigovým rozptylem je pak dána rovnicí:

$$I = I_0 \left(\frac{1 + \cos^2 \theta}{2r^2}\right) \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 1}\right)^2 \left(\frac{d}{2}\right)^6, \qquad (2.2)$$

kde θ je rozptylový úhel, r je vzdálenost od částice, λ je vlnová délka světla, n je index lomu částice (vzduchu) a d je velikost (průměr) částice. Rozptylový úhel je ukázán na obrázku (2.2). [5] [6]



Obrázek 2.2: Rozptylový úhel [8]

2.2 Mieův rozptyl

Mieův rozptyl je obecný případ Rayleighova rozptylu. Projevuje se ale na částicích, které jsou srovnatelné a větší než je rozptylované světlo. Tyto částice jsou aerosoly v nižších výškách zemské atmosféry. Koeficienty pro Mieův rozptyl jsou:

$$\beta_M^s(h,\lambda) = \beta_M^s(0,\lambda)e^{-\frac{n}{H_M}},\tag{2.3}$$

kde M je označuje Mieův rozp
tyl. Výsledná intenzita je pak přímo úměrná druhé mocnině vlnové dél
ky světla:

$$I(\theta, r) = I_0 \frac{\lambda^2 (i_1 + i_2)}{4\pi^2 r^2},$$
(2.4)

kde λ je vlnová délka světla a parametry *i* jsou Mieovy parametry, dané komplikovanými funkcemi $d\lambda$, θ a *n*. Rozdíl mezi Rayleighovým a Mieovým rozptylem je znázorněn na obrázcích (2.3) a (2.4). Na prvním obrázku je vidět, jak se mění směr rozptylovaného světla vzhledem k velikosti částic. Při Rayleighově rozptylu na menších částicích se světlo rozptyluje prakticky rovnoměrně, kdežto u větších částic je důležitý směr, odkud záření dopadá. Většina záření je rozptýlena do směru rovnoběžného s dopadem a to tak, že čím větší částice, tím je rozptyl v tomto směru větší. Obrázek (2.4) ukazuje prakticky to samé, jen je zde nastíněno, kde bude hrát Mieův rozptyl větší roli. [1] [6] [7] [8]



Směr dopadajícího záření

Obrázek 2.3: Mieův rozptyl na větších částicích [9]



Obrázek 2.4: Rozdíl mezi Rayleighový a Mieovým rozptylem [9]

Kapitola 3

Spektrum Slunce

3.1 Záření černého tělesa

Každý objekt ve vesmíru vysílá do okolí záření. Ať už je to vlastní záření nebo záření odražené, stále se dá měřit. Černé těleso je fyzikální model tělesa, které veškeré záření, které na něj dopadne, pohltí a žádné neodrazí zpět. Potom výsledné měřené záření pochází právě a jen od tohoto zdroje. Intenzita a vzhled takového spektra je pak dána hlavně teplotou tohoto zářiče. Při nízkých teplotách by se pak těleso jevilo jako černé. Záření Slunce se pak v prvním přiblížení chová jako záření absolutně černého tělesa o teplotě přibližně 5800 K. Pojem černé těleso zavedl už v roce 1862 Gustav Kirchhoff. Nicméně zákon, který popisuje záření černého tělesa se jmenuje Planckův vyzařovací zákon. Pro spektrální hustotu vyzařování v závislosti na vlnové délce má tvar:

$$H_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1\right)},\tag{3.1}$$

kde h je Planckova konstanta, c je rychlost světla ve vakuu, λ je vlnová délka světla, k je Boltzmannova konstanta a T je teplota tělesa kelvinech. Křivka pro Slunce je vidět na obrázku (3.1). [11] [12]

3.2 Fraunhoferovy čáry

V roce 1802 si anglický chemik William Hyde Wollaston při zkoumání viditelné části slunečního spektra všiml tmavších míst. O pár let později pak tato místa znovu objevil Joseph von Fraunhofer a začal je systematicky zkoumat a měřit



Obrázek 3.1: Záření Slunce jako černého těleso [10]

jejich vlnové délky. Později byla tato místa, kde byla intenzita nižší, nazvána Fraunhoferovy čáry. Sám Fraunhofer jich za svého života objevil přes 570. My díky moderním přístrojům můžeme těchto spektrálních čar naměřit tisíce. Je to dáno tím, že jakýkoli plyn pohlcuje záření na stejných vlnových délkách, na kterých sám září. Prochází-li záření látkou, může dojít k přechodu jednoho kvantového stavu do druhého a část spektra o dané vlnové délce se pohltí (absorbuje) a vzniká tak absorpční spektrum. [13]



Obrázek 3.2: Moje naměřené spektrum Slunce a popis vybraných absorpčních čar.

Označení	Prvek	Vlnová délka [nm]
K	Ca ⁺	393,366
Н	Ca^+	396,847
G	Ca	430,774
е	Fe	438,355
F	$H\beta$	486,134
С	Fe	495,761
b	Mg	518,362
Е	Fe	527,039
D ₁	Na	589,592
D_2	Na	588,995
a	O_2	627,661
С	$H\alpha$	656,281
В	O_2	686,719
А	O_2	759,370

Tabulka 3.1: Označení vybraných Fraunhoferových čar[13].

Kapitola 4 Postup měření a měřící aparatura

K naměření potřebných údajů byla použita aparatura sestávající z dalekohledu, na který bylo skrze sluneční filtr napojeno optické vlákno. To bylo spojeno se spektrometrem, který byl již ovládán na počítači. Následné měření pak probíhalo tak, že se dalekohled namířil na námi studovaný objekt (kalibrační lampy, Slunce apod.) a na počítači se nastavila integrační doba tak, aby intenzita spektra dávala relevantní výsledky. Příliš dlouhá integrace vede k tzv. saturaci, kdy jsou jednotlivé CCD čipy spektrometru přesyceny a intenzita spektra neodpovídá skutečnosti. Na druhou stranu pak příliš krátká integrační doba nemusí odhalit veškerou strukturu námi studovaného spektra. Jednoduchý princip jednotlivých částí aparatury je rozebrán v následujících podkapitolách.

4.1 Dalekohled

Dalekohled nebo též teleskop je optický přístroj, který laicky řečeno zvětšuje vzdálený pozorovaný objekt. Pro vědce je pak důležitější jiná jejich vlastnost, a to ta, že sbírají více fotonů od pozorovaného objektu a ty pak soustřeďují do jednoho bodu tzv. ohniska. Vynález dalekohledu je připisován holandskému vědci a optikovi Hansi Lipperseymu, který si svůj vynález 2. října roku 1608 nechal patentovat. Kdo ale jako první použil soustavu čoček k systematickému pozorování, byl slavný Galileo Galilei. Objektiv takzvaného Galileova dalekohledu tvoří spojka; okulár pak rozptylka. Galileův dalekohled pak vylepšil další známý astronom Johannes Kepler. Ten místo rozptylky použil další spojku. Tím však získal obraz převrácený. Obraz byl ostřejší a tím byl pro další použití v astronomii vhodnější. S vývojem techniky se měnily i postupy při výrobě dalekohledů. vynálezci postupně vyměnili čočky za zrcadla, která obraz zvětšují odlišně; poz-

ději se k výrobě dalekohledů použily jak čočky tak i zrcadla. V jednoduchosti lze proto dalekohledy rozdělit na refraktory, které jsou tvořeny jen čočkami, jako je dalekohled Galileův (obr. 4.1) nebo Keplerův (obr. 4.2); reflektory, tvořené zrcadly (např. Newtonův dalekohled (obr. (4.3)) a na kombinované systémy (čočka-zrcadlo). Zástupcem takového kombinovaného systému je například Schmidt-Cassegrainův dalekohled (obr. 4.4). [14] [15]



Obrázek 4.1: Schéma Galileova da- Obrázek 4.2: Schéma Keplerova lekohledu [16] dalekohledu [16]



Obrázek 4.3: Schéma Newtonova dalekohledu [14]



Obrázek 4.4: Schéma Schmidt-Cassegrainova dalekohledu [14]

4.2 Montáže

Aby dalekohled stál pevně na zemi a my s ním mohli hýbat, různě otáčet a nastavovat ho na námi pozorovaný objekt, musíme ho ustavit. Proto se používají takzvané montáže, které se rozdělují podle sklonu os do dvou kategorií.

4.2.1 Montáž azimutální

Tato relativně jednoduchá montáž je sestavena ze dvou na sebe kolmých os. Horizontální osa nám mění výšku nad horizontem, vertikální pak mění azimut. Měří se tedy výška nad obzorem a úhel (azimut). Konstrukce této montáže je celkem jednoduchá a často se používá u malých levných dalekohledů. Naproti tomu se hojně využívá i u těch největších dalekohledů na světě. Je to dáno tím, že při použití montáže paralaktické (viz níže) by byly na stavbu velkých observatoří vyžadovány vysoké technologické nároky.

Nevýhodou této montáže je relativně složité sledování objektů na obloze, a to kvůli otáčení Země. I když se člověk naučí hýbat s oběma osami a hvězdu či cokoli jiného sledovat, nastane problém se stáčením zorného pole. A to hlavně při fotografování vesmírných objektů. Každý problém se dá samozřejmě vyřešit a to takzvaným derotátorem zorného pole, kterým musíme montáž vybavit. Příkladem azimutální montáže tzv. Dobsonova montáž (obrázek (4.5)). [17]



Obrázek 4.5: Dobsonova montáž [17]

4.2.2 Montáž paralaktická

Pokud skloníme azimutální osu a přeorientujeme ji rovnoběžně se zemskou osou, dostaneme montáž paralaktickou. Sklon této osy pak bude shodný se zeměpisnou šířkou pozorovacího místa a my si pak zjednodušíme sledování objektů na obloze. Tato osa se nazývá polární (případně hodinová), druhá osa deklinační. Pak se u tohoto systému měří hodinový a deklinační úhel. Paralaktická montáž se pak rozděluje na několik druhů; jako příklad uvedu montáž německou (4.6) nebo montáž rámovou (4.7). [17]



Obrázek 4.6: Německá montáž [17] Obrázek 4.7: Rámová montáž [17]

4.3 Optické vlákno

K přenosu informace mezi dalekohledem a spektrometrem je zapotřebí cesty, kterou nám zajišťuje optické vlákno. Je to vlákno vyrobené ze skla, případně z plastu, které přenáší elektromagnetické signály. Světlo se šíří ve směru osy s využitím principu totálního odrazu na rozhraní dvou prostředí s rozdílným indexem lomu. Vnitřní část vlákna se nazývá jádro, které je obaleno pláštěm a dalším ochranným obalem. K vazbě signálu na jádro vlákna musí být index lomu jádra větší než je u pláště.

4.3.1 Index lomu

Index lomu udává změnu rychlosti elektromagnetického signálu mezi různými prostředími a vakuem, kde se světlo pohybuje maximální rychlostí c=299 792 458 km \cdot s⁻¹. Výsledný index lomu se pak vypočítá takto:

$$n = \frac{c}{v},\tag{4.1}$$

kde c je právě rychlost světla ve vakuu, v je rychlost světla v hmotném prostředí a n je pak námi chtěný index lomu. Pro plášť vlákna se nejčastěji uvádí index lomu $n_p = 1,46$, pro jádro pak $n_j = 1,48$.

4.3.2 Totální odraz

Prochází-li světlo z materiálu opticky hustšího s indexem lomu (v našem případě) n_j do materiálu opticky řidšího n_p , pak s rostoucím úhlem dopadu roste i úhel lomu. Při jistém úhlu, tzv. mezním úhlu dopadu α_m , bude $\beta=90^\circ$. Při mezním úhlu ještě nastává lom světla. Při úhlech větších ($\alpha > \alpha_m$) se pak jen světlo odráží a nastává totální odraz. Ve Snellově zákoně:

$$\frac{\sin \alpha_m}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1},\tag{4.2}$$

je pak jmenovatel na levé straně roven jedné, přechází pak tento zákon do tvaru:

$$\sin \alpha_m = \frac{n_2}{n_1}.\tag{4.3}$$

Princip, na kterém funguje světelné vlákno, je vidět na obrázku 4.8. [18] [19]



Obrázek 4.8: Totální odraz na optickém vlákně [18]

4.4 Spektrometr

Viditelné světlo je jen část elektromagnetického záření, které dopadá na zemský povrch z okolního vesmíru. Každý zdroj září na různém rozsahu vlnových délek, přičemž existují oblasti, kde je jeho intenzita větší a naopak. Abychom mohli změřit intenzitu záření na potřebných vlnových délkách, musíme použít spektrometr. Ten přicházející paprsek od zdroje rozloží na jednotlivé složky a následně pak proměří jejich intenzitu. Výstupem je pak takzvané spektrum, které se může lišit, co do rozsahu tak i do rozlišení v závislosti použitého přístroje či jeho částí.

4.4.1 Monochromátor

Monochromátor je jednou z nejdůležitějších součástí spektrometru. Je složen z několika hlavních částí. Jednoduché schéma je vidět na obrázku (4.9). Aby se světlo dostalo do jeho útrob, musí nejdřív do něj vstoupit. K tomu slouží vstupní štěrbina. Odtud se paprsek dostává na kolimátor, který původní různoběžný svazek soustředí do jednoho směru a vytvoří tak svazek rovnoběžný. Ten pak dopadá na disperzní člen, který pomocí ohybu (hranol) nebo odrazu (mřížka) rozloží svazek na menší úseky vlnových délek. Ty se liší použitím mřížek s různým počtem vrypů apod. Již rozložený paprsek se následně fokusuje na další část spektrometru – detektor, kterým může být například CCD čip, nebo fotografická deska.



Obrázek 4.9: Monochromátor [22]

4.4.2 Sekvenční spektrometry

V sekvenčních spektrometrech je spektrum snímáno postupně. Měření probíhá jako scan, kdy se měří jen úzká část spektra. Vlnová délka se pak mění jen natočením disperzního prvku. Proměření celého spektra pak trvá oproti simultánním spektroskopům déle, nicméně rozlišení je větší; v kombinaci se správnou mřížkou se dá proměřit spektrum o velikém rozsahu. [21]

4.4.3 Simultánní spektrometry

U spektrometrů simultánních se difrakční člen nepohybuje. Je jím dutá mřížka, která stojí stále na místě, výsledná intenzita záření se pak měří na více výstupních štěrbinách současně. Měření je pak podstatně kratší s ohledem na rozlišení výsledného spektra. [21]

4.5 Mnou použitý systém

4.5.1 Dalekohled

Dalekohled, který jsme k měření použili byl Celestron o průměru zrcadla 150 mm a světelnosti 1/10 typu Schmidt-Cassegrain na automatizované německé montáži. Zrcadlo je ošetřeno antireflexní vrstvou, kterou jsme nejspíše naměřili při kalibračním měření viz níže (obr. 5.4), kde jsou na 950 nm respektive na 1100 nm

vidět interference na tenké vrstvě. V průběhu měření se ukázala být německá montáž jako nevyhovující k provádění našeho pokusu, protože se nám nepodařilo spustit naváděcí systém. Nastavovat proto celý systém ve dvou osách značně stěžovalo celé měření. Pro tento pokus by se více hodila montáž azimutální.



Obrázek 4.10: Mnou používaný dalekohled [23]

4.5.2 Sluneční filtr

Aby nedošlo k poškození spektroskopu při přímém měření slunečního spektra, vložili jsme do ohniska dalekohledu sluneční filtr, který snížil intenzitu záření. Jednalo se o dvě sklíčka z křemenného skla, která světlo odrážela pod úhlem 45°. Odrazivost R_S S-polarizovaného světla dopadajícího pod tímto úhlem je $R_S=8,22$ %, pro P-polarizované světlo činí odrazivost $R_P=0,68$ %. Celková odrazivost nepolarizovaného světla se pak vyjádří $(R_S+R_P)/2$, číselně tedy 4,45 %. Závislost odrazivosti na úhlu dopadu je vidět na obrázku (4.11). Aby se různé hodnoty odrazivosti pro obě složky polarizace vykompenzovali, sklíčka byla vůči

sobě otočena o 90°. Celková odrazivost pak tedy byla přibližně 0,16 %. V případě měření oblohy nebylo záření už tak silné a měření bylo kompromitováno zářením z okolí, které procházelo právě těmito sklíčky. Proto se při měření okolní oblohy musel sluneční filtr odstranit a měření probíhalo bez něj.



Obrázek 4.11: Závislost odrazivosti jednotlivých složek polarizace na úhlu dopadu [20]

4.5.3 Spektrometr

Mnou použitý spektrometr byl simultánní spektrometr od společnosti Avantes AvaSpec SensLine (4.12). Rozsah vlnových délek má tento spektrometr 200– 1100 nm.



Obrázek 4.12: Mnou použitý spektroskop [24]

Kapitola 5 Kalibrační měření

Při průchodu světla dalekohledem se část spektra ztratí. Dalekohled má určitou citlivost a ta je primárně ve viditelné oblasti spektra. Proto jsme museli tuto citlivost zjistit, abychom mohli správně interpretovat naměřená data. Proto jsme provedli kalibrační měření na dvou lampách, u kterých jsme znali průběh jejich spektra. Z každé lampy jsme potom dostali její kalibrační křivku a spojením nich jsme zjistili citlivost našeho systému (obrázek (5.5)). Z křivky vidíme, že pro vyhodnocování naměřených dat je lepší vyhnout se okrajovým částem spektra, kde je citlivost velmi malá a zaměřit se na oblasti kolem vlnových délek 400–800 nm.

5.1 Deuteriová lampa

Jako první jsme použili deuteriovou lampu. V přesně dané vzdálenosti, udávanou výrobcem, jsme ji umístili před dalekohled a pomocí něj a výše uvedené aparatury jsme naměřili několikrát její spektrum. Výsledné naměřené spektrum je pak průměrem všech měření. Jeho průběh je vidět na obrázku (5.1). Na obrázku je vidět i teoretický průběh spektra. Oblast je vyobrazena takto kvůli kalibračním datům. Výslednou kalibračním křivku vidíme na obrázku (5.2). Její funkci jsme získali jednoduchým podílem teoretické hodnoty a hodnoty naměřené. Je zde vidět, že krátké vlnové délky jsou absorbovány a proto je zde výsledná citlivost hodně malá.



Obrázek 5.1: Naměřené a teoretické spektrum Deuteria

5.2 Halogenová lampa

Stejně jako lampu deuteriovou jsme halogenovou lampu umístili před dalekohled v dané vzdálenosti a naměřili několikrát průběh jejího spektra. Průměr ze všech měření je vidět na obrázku (5.3), kde je i vykreslena teoretická funkce. Z pouhého porovnání je vidět, že nejvyšší citlivost našeho systému je poněkud jinde než je tomu u halogenu. Kalibrační křivku jsme stejně jako v předchozím případě dostali podílem teoretické a naměřené hodnoty a její průběh je na obrázku (5.4). Co je zde jasně patrné, jsou dva interferenční píky, způsobené patrně interferencí na tenké vrstvě zrcadla dalekohledu, které bylo ošetřeno antireflexní ochranou.



Obrázek 5.2: Kalibrační funkce Deuteria



Obrázek 5.3: Naměřené a teoretické spektrum halogenu



Obrázek 5.4: Kalibrační funkce Halogenu



Obrázek 5.5: Citlivost aparatury

Kapitola 6 Vlastní měření

Ukolem této práce bylo naměřit a poté vyhodnotit spektrum Slunce a později i oblohy v různých časech. Sluneční spektrum jsem tedy měřil každou půlhodinu, spolu i s různými částmi oblohy. Po několika pokusech jsem se rozhodl následovně. Oblohu jsem si rozdělil na pět různých částí (plus Slunce) takto. 0° označuje obzor východní, 45° označuje úhel cca 45° mezi zenitem a 0° na přímce přes Slunce. 135° podobně to samé jen směr spíše západní. 180° již logicky je označení pro obzor na západě. Zenit je pak už jasný. Polohy těchto bodů na obloze se měnily tak, jak se pohybovalo Slunce a to tak, aby vždy ležely na jedné přímce Slunce-zenit. Celé měření probíhalo na střeše Hvězdárny a planetária Brna na Kraví hoře ve čtvrtek 21.4.2016. Celý den bylo jasno, ráno se teploty pohybovaly kolem nuly, během dne se dostaly až k 17-ti stupňům. Slunce vyšlo v 5:50 na východě a zapadlo v 19:55 západním směrem. Vývoj teploty a tlaku vzduchu je vidět na obrázku (6.1). Vzdušnou vlhkost rozeberu v podkapitole níže. Veškerá data jsou převzata z [25]. Měření probíhalo tak, že jsem nastavil dalekohled nejdříve na Slunce a provedl měření s patřičným nastavením integrační doby. Poté jsem dalekohled obrátil k obzoru, nezapomněl sundat sluneční filtr, nastavil integrační dobu a změřil spektrum oblohy. Stejný postup jsem aplikoval na všechny výše zmíněné polohy na obloze. Po naměření západního obzoru jsem znovu vrátil sluneční filtr do ohniska dalekohledu, aby nedošlo k poškození spektrometru ve chvíli, kdy jsem zase po 30-ti minutách obrátil dalekohled zpět ke Slunci a celé měření opakoval. Takto probíhalo měření po celý den, než zapadlo Slunce. Pak jsem již jenom měřil vybrané části oblohy a to v rozmezí půl hodiny v co nejkratších intervalech, aby byla vidět případná změna spektra.



Obrázek 6.1: Vývoj teploty a tlaku vzduchu [25]

6.1 Zpracování výsledných spekter

Z jednoho pozorovacího dne jsme nakonec získali přes 200 spekter, které bylo nutno správně zpracovat. Bylo nutné je správně rozdělit podle času a směru pozorování. Zpracování pak probíhalo tak, jak jsme potřebovali vyhodnotit výsledky. Nejdříve jsme vybrali všechna spektra Slunce a ta se znormovala podle integrační doby, abychom viděli vývoj spektra přes den. Aby byly grafy přehledné, rozdělil jsem je do skupin podle času měření. Následně jsme všechna spektra Slunce znormovali naší kalibrační/citlivostní funkcí a podělili spektrem Slunce z vesmíru. Jak bylo psáno výše, pro toto zpracování jsme se rozhodli soustředit se jenom na oblast 400–800 nm. Po zpracování slunečních spekter jsme se ještě podívali na spektra oblohy. Vybrali jsme nejzajímavější časy (viz níže) a ty znormovali přes kalibrační funkci jako u Slunce. Druhý způsob normování byl na vybranou část spektra, kde se jednotlivá spektra moc neměnila.

6.2 Slunce

Spektrum Slunce po průchodu atmosférou se liší od toho mimo Zemi tou částí spektra na které se uplatňuje rozptyl. Nazveme-li spektrum mimo Zemi ETS, rozptylovou funkci $f(\lambda)$, pak spektrum Slunce po průchodu atmosférou Slunce bude mít tvar:

$$Slunce = ETS * (1 - f(\lambda))$$
(6.1)

6.2.1 Normování přes integrální dobu

Normováním přes integrační dobu jsme chtěli dosáhnout toho, abychom viděli, jak se vyvíjí spektrum Slunce přes den. Je celkem patrné, že intenzita spektra bude růst i s výškou Slunce nad obzorem. To se potvrzuje i v našem měření. Na obrázku (6.2) vidíme vývoj spektra v ranních hodinách. Dle předpokladu s rostoucím časem roste i intenzita záření. Stejný vývoj vidíme i na obrázku (6.3), který znázorňuje spektrum slunce přes poledne. V pár případech nicméně náš předpoklad neplatí, což si vysvětluji tím, že se mi nepodařilo nasměrovat dalekohled přímo na Slunce a měřili jsme tedy místo vedle něj. Spektrum Slunce odpoledne znázorňuje obrázek (6.4). Zde již vidíme změnu opačnou. S přibývajícím časem Slunce klesá zpět k obzoru a tím i klesá intenzita dopadajícího záření. Večer (obrázek (6.5)) je pokles ještě větší. Navíc se zde již více projevuje Mieův rozptyl, který vidíme od času 19:00, kde začíná přibývat oblast od cca 600 nm. V čase 19:25 je už Mieův rozptyl dominantnější než rozptyl Rayleighův, kdy se oblast do 500 nm začíná propadat. Stav po západu Slunce je na obrázku (6.7). Zde je již červená část spektra výrazně dominantní. V době označené jako "Slunce zapadlo" si navíc můžeme všimnout poklesu intenzity uprostřed spektra, která je dána spojením obou rozptylových funkcí. Na obrázcích si je možné všimnout zvlnění v oblastech kde byla v průběhu kalibrace pozorována interference. Měnící se profil lze přisuzovat lehce rozdílnému úhlu, pod kterým záření dopadlo na objektiv dalekohledu.



Obrázek 6.2: Spektrum Slunce v ranních hodinách



Obrázek 6.3: Spektrum Slunce přes poledne



Obrázek 6.4: Spektrum Slunce v odpoledních hodinách



Obrázek 6.5: Spektrum Slunce ve večerních hodinách



Obrázek 6.6: Spektrum Slunce při jeho západu



Obrázek 6.7: Spektrum Slunce při vybraných časech

6.2.2 Normování přes kalibrační funkci

Jak jsem uvedl již výše, námi použitý optický systém měl optimální citlivost v rozsahu 400–800 nm, kde se zároveň nachází i maximum slunečního záření. Proto jsme vybrali tuto část spektra jako nejvhodnější k dalšímu zpracování a kalibrační funkci jsme aplikovali právě sem. Námi naměřené spektrum jsme normovali, tak aby byl integrál funkce roven jedné. Stejně jsme normovali i spektrum Slunce mimo Zemi a do grafu jsme vynesli poměr těchto dvou spekter. Díky tomu lze pozorovat, kde došlo k úbytku a kde k přírůstku intenzity k poměru mimozemského spektra. Černá čára na jedničce ukazuje jak by vypadalo takto zpracované spektrum, kdyby se nedeformovalo rozptylem v atmosféře.

Na obrázku (6.8) vidíme takto normované spektrum v ranních hodinách. Můžeme si všimnout snižujícího se podílu Mieova rozptylu s rostoucím časem. Zároveň se snižuje absorpce vody a kyslíku a celé spektrum se postupně vyrovnává přibližně do přímky, kterou ruší jenom šum a občas již několikrát zmiňovaná interference na tenké vrstvě. Na obrázku (6.9) je k vidění spektrum v dopoledních hodinách. Výrazné jsou čáry vody a kyslíku, jinak je spektrum přibližně konstantní, až na výrazný pík při 12-ti hodinách na 630–640 nm. Odpoledne (obrázek (6.10)) je situace velmi podobná. Zajímavá situace nastává až večer (obrázek (6.11)). Zde je vývoj podobný jako ráno. S přibývajícím časem se snižuje výška nad obzorem a zvyšuje se i podíl Mieova rozptylu. Ještě výrazněji je Mieův rozptyl a absorpce na kyslíku a vodě vidět při západu Slunce na obrázku (6.12).

6.3 Spektrum oblohy

Dalším zajímavým úkolem této práce se nakonec ukázalo být měření okolní oblohy. Jako v případě Slunce jsme zvolili dvě různé normování, abychom se podívali na více aspektů změn ve spektrech. Spektrum oblohy se liší od spektra Slunce mimo Zemi právě rozptylovou funkcí a to tak:

$$Obloha = ETS * f(\lambda), \tag{6.2}$$

kde ETS je jako v případě u Slunce spektrum Slunce mimo zemskou atmosféru, $f(\lambda)$ je právě rozptylová funkce a *Obloha* je spektrum oblohy.



Obrázek 6.8: Normované spektrum Slunce v ranních hodinách



Obrázek 6.9: Normované spektrum Slunce v poledních hodinách



Obrázek 6.10: Normované spektrum Slunce v odpoledních hodinách



Obrázek 6.11: Normované spektrum Slunce ve večerních hodinách



Obrázek 6.12: Normované spektrum Slunce při západu

6.3.1 Normování na místo ve spektru

Po prozkoumání jednotlivých spekter, jsme usoudili, že v oblasti okolo 770 nm se již spektra vzájemně moc neliší. Proto normování proběhlo právě na tuto oblast, přesněji na vlnovou délku λ =778 nm.

Na obrázku (6.13) je ranní spektrum oblohy. Spektrum Slunce a na obzoru zřetelně ztrácí modrou část spektra, protože je zde stále dominantní Mieův rozptyl, zatímco například oblast kolem zenitu nebo 135° se začíná prosazovat rozptyl Rayleighův a roste intenzita v modré oblasti spektra. Tento trend můžeme pozorovat i na následujících třech obrázcích (6.14), (6.15) a (6.16). Na všech třech obrázcích se v části oblohy kolem zenitu zvyšuje oblast od 400 do 450 nm a to celkem znatelně, kdežto oblast kolem 700 nm prakticky vymizí. V těch částech oblohy, kde bylo Slunce relativně blízko a na Slunci samotném, modrá část spektra taktéž vystupuje, ale ne tak markantně. Večer (obrázek (6.17)) je pak situace podobná jako ráno. Na obzorech a na Slunci je dominantní část dlouhých vlnových délek, zbytek oblohy začíná postrádat rayleighově rozptýlenou modrou část.

Po západu Slunce pak nárůst dominance Mieova rozptylu pokračuje. To ukazují obrázky (6.18), (6.19) a (6.20). Intenzita u dlouhých vlnových délek se začíná zvyšovat, zatímco intenzita u těch krátkých snižovat. Zajímavý děj se ale začíná odehrávat v oblasti mezi nimi, respektive v oblasti od 570 do 630 nm. Je zde vidět znatelný pokles intenzity, který je způsoben tím, že se poměry obou rozptylových funkcí, jak Mieho tak Rayleighovy, začínají vyrovnávat a jejich součet dává právě minimum v této oblasti. Dále si lze všimnout zvyšující se absorpce vody a molekulárního kyslíku.



Obrázek 6.13: Spektrum oblohy v 6 hodin ráno



Obrázek 6.14: Spektrum oblohy v 9 hodin ráno



Obrázek 6.15: Spektrum oblohy ve 12 hodin



Obrázek 6.16: Spektrum oblohy v 16 hodin



Obrázek 6.17: Spektrum oblohy v 19 hodin 25 minut



Obrázek 6.18: Spektrum oblohy v 19 hodin 52 minut



Obrázek 6.19: Spektrum oblohy v 19 hodin 58 minut



Obrázek 6.20: Spektrum oblohy ve 20 hodin 7 minut

6.3.2 Normování přes kalibrační funkci

Abychom ale viděli podíl Rayleighova a Mieova rozptylu ještě lépe, podívali jsme se na rozptylovou funkci samotnou. Od oblohy jsme tedy oddělili sluneční spektrum a kalibrační funkci našeho systému. Jako v případě Slunce jsme se zaměřili na nejméně poškozenou část spektra a to oblast 400–800 nm. I zde černá čára ukazuje hranici, kam by sahalo spektrum nedeformované rozptylem.

Pro vyhodnocení takto zpracovaných dat jsme vybrali jen pár zajímavých časů během dne. Na obrázku (6.21) vidíme spektrum oblohy v 6 hodin. Jako první si všimneme zvýšení intenzity u Slunce a u 0° v červené části spektra. Slunce je v tu dobu jen velice nízko nad obzorem a je tu tedy markantní Mieův rozptyl. Naproti tomu u zbylých částí oblohy se postupně dostává do popředí modrá část spektra. Ještě více je to vidět na obrázku (6.22). Zde je již dominantní rozptyl Rayleighův. Jediné místo, kde se ještě trochu znatelně projevuje Mieův rozptyl je východní obzor. To už ale neplatí pro dvanáctou hodinu (obrázek 6.23). Zde je již vidět vyšší intenzita jen v modré oblasti spektra. Spektrum v 16 hodin (obrázek (6.24)) je prakticky srovnatelné se spektrem v 9 hodin. Podobně je na tom i spektrum v 19:25, které se dá ztotožnit se spektrem v 6 hodin. Začíná se tu projevovat Mieův rozptyl a pravá strana spektra začíná růst.

Po západu Slunce je Mieův rozptyl stále více dominantní. Na obrázcích (6.26),

(6.27) a (6.28) je tento trend krásně vidět. Na obrázcích (6.18), (6.19) a (6.20) jsme si všimli poklesu intenzity v oblasti 570–630 nm. Jako v případě Slunce, je to dáno součtem záření rozptýleného světla Rayleigovým a Mieovým rozptylem, které má v tomto místě minimum.



Obrázek 6.21: Spektrum oblohy 6 hodin s kalibrační funkcí



Obrázek 6.22: Spektrum oblohy v 9 hodin s kalibrační funkcí



Obrázek 6.23: Spektrum oblohy ve 12 hodin s kalibrační funkcí



Obrázek 6.24: Spektrum oblohy v 16 hodin s kalibrační funkcí



Obrázek 6.25: Spektrum oblohy v 19 hodin 25 minut s kalibrační funkcí



Obrázek 6.26: Spektrum oblohy v 19 hodin 52 minut s kalibrační funkcí



Obrázek 6.27: Spektrum oblohy v 19 hodin 58 minut s kalibrační funkcí



Obrázek 6.28: Spektrum oblohy ve 20 hodin 7 minut s kalibrační funkcí

6.3.3 Měření vlhkosti vzduchu

Na většině přiložených spektrech si lze všimnout více či méně výrazné absorpce vody. Proto jsme se rozhodli zkusit vyhodnotit její absorpci, jak se vyvíjela ten den v čase. Vybrali jsme oblast kolem absorpce vody ve spektru a tuto část spektra jsme v této oblasti aproximovali přímkou a integrovali. Poté jsme oblast integrovali podruhé s tím rozdílem, že jsme brali již naše naměřené spektrum. Obě čísla jsme od sebe odečetli a podělili hodnotou druhého integrálu. Výsledkem je právě absorpce vody v procentech. Celé vyhodnocování jsme udělali pro spektrum sluneční a pro oblast oblohy ve 135°. Porovnání s hodnotami vzdušné vlhkosti měřené právě na hvězdárně je na obrázku (6.29). Na první pohled je již patrné, že námi vypočítané hodnoty s těmi naměřenými nekorelují. Vlhkost vypočítaná ze spektra Slunce se vyvíjí přesně podle toho jak se Slunce pohybovalo na obloze. Jak při východu tak i při západu záření ze Slunce procházelo největší vzdušnou hmotou, proto je zde absorpce největší. Vlhkost ze spektra měřeného na 135° žádný výrazný trend neznačí, proto si troufám tvrdit, že nelze takto odvodit vzdušnou vlhkost z absorpčního spektra. Data pro vzdušnou vlhkost z hvězdárny jsem převzal z [25].



Obrázek 6.29: Vypočítaná vzdušná vlhkost v porovnání s daty z hvězdárny

Kapitola 7

Závěr

Úkolem této práce bylo naměřit a vyhodnotit sluneční spektrum a jak se vyvíjejí jeho změny v čase. V průběhu dne se změny vyvíjeli podle našich předpokladů. Dle předpokladu se intenzita záření ze Slunce zvyšovala s jeho rostoucí výškou na obloze. Potvrdila se i rovnice (6.1), kdy je vidět, že ta část spektra, která se v danou dobu rozptyluje, chybí ve spektru Slunce. I postupné zvyšování modré oblasti spektra během dne a jeho pokles ráno a večer, kdy se dominantní stává oblast dlouhých vlnových délek, koresponduje s předpokladem, že za tímto jevem stojí oba druhy rozptylu, které jsou popsané v kapitole 2.

Tento předpoklad je pak ještě lépe k vidění při měření oblohy. Mieův rozptyl je nejvíce dominantní v ranních a večerních hodinách a projevuje se hlavně v okolí obzoru. Rayleighův rozptyl zase svou roli hraje ve vyšších výškách nad obzorem, kdy je sloupec vzduchu užší a tím pádem záření prochází i tenčí vrstvou aerosolů v nízkých výškách. Spektrum oblohy pak vypadá, tak jak nám to vyjadřuje rovnice (6.2). Projevuje se zde hlavně rozptylovací funkce daná rovnicemi (2.2) a (2.4). Nejzajímavější případ, však nastává v době po západu Slunce. Nicméně po podrobném prozkoumání obou rovnic a jejich koeficientů, by nás výsledky neměly překvapit.

Co se ukázalo jako chybné, bylo myslet si, že ze spektra půjde jednoduše měřit vzdušná vlhkost. Absorpce vody v naměřených spektrech jistý profil má, nicméně nekoresponduje s naměřenými hodnotami. Je to dáno tím, že vzdušná vlhkost se standardně měří na jednom místě v přízemních výškách. My jsme se ji pokoušeli odhadnout přes různou tloušťku vzdušné masy na různých místech na obloze.

Bylo naměřeno velké množství dat, z těchto dat jsme se pokusili vybrat nejrelevantnější a zpracovat je do srozumitelné formy. Byla ukázána závislost spektra Slunce a oblohy v závislosti během jednoho dne a ukázán vliv rozptylu na tato spektra.

Literatura

- [1] B. Sportisse.: Fundamentals in Air Pollution from Processes to Modelling, Springer Science+Business Media, New York, 2010.
- [2] https://cs.wikipedia.org/wiki/Raman%C5%AFv_jev
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/Brillouin_scattering
- [4] https://www.jandur.cz/optics/rozptyl/ro1.htm
- [5] http://www.che.utah.edu/~ring/ChE-6960/Chapter_5_Ring.pdf
- [6] http://www.scratchapixel.com/old/lessons/3d-advanced-lessons/ simulating-the-colors-of-the-sky/atmospheric-scattering/
- [7] http://www.orc.soton.ac.uk/publications/theses/1460T_lnn/ 1460T_lnn_03.pdf
- 8 http://file.scirp.org/Html/10-3400131_17669.htm#Figure2
- [9] http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html
- [10] http://www.infrared.cz/Technologie/Zaklad/planck_slunce.png
- [11] http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/ 538-zareni-absolutne-cerneho-telesa
- [12] https://cs.wikipedia.org/wiki/Absolutn%C4%9B_%C4%8Dern%C3%A9_ t%C4%9Bleso
- [13] https://cs.wikipedia.org/wiki/Fraunhoferovy_%C4%8D%C3%A1ry#/
- [14] http://www.aldebaran.cz/astrofyzika/orientace/dalekohledy.html
- [15] https://cs.wikipedia.org/wiki/Dalekohled

- [16] http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/ 503-kepleruv-hvezdarsky-dalekohled
- [17] http://www.juryko.cz/astronomie/item/14-mont%C3%A1%C5% BEe-astronomick%C3%A9-dalekohledu/
- [18] http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/ 440-uplny-odraz-svetla
- [19] https://cs.wikipedia.org/wiki/Optick%C3%A9_v1%C3%A1kno
- [20] http://refractiveindex.info/?shelf=main&book=SiO2&page= Malitson
- [21] http://cheminfo.chemi.muni.cz/chem_sekce/predmety/C7300/AES/ ICP-OES.pdf
- [22] http://automatizace.hw.cz/files/images/smallspektrometr_ zakladni_princip2.jpg
- [23] http://www.celestron.com/browse-shop/astronomy/telescopes/ advanced-vx-6-schmidt-cassegrain-telescope
- [24] http://www.avantes.com/products/spectrometers/sensline/item/ 333-avaspec-uls-tec
- 25 http://www.in-pocasi.cz/meteostanice/stanice-historie.php