

Modernizovaný spektrograf HSFA2 – první zkušenosti, výsledky a výhledy

P. Kotrč, Astronomický ústav AV ČR, Ondřejov, pkotrc@asu.cas.cz

Ju. A. Kuprjakov, GAISH, Moskva, Rusko, kupry@sai.msu.ru

J. Leško, Astronomický ústav AV ČR, Ondřejov, lesko@asu.cas.cz

Abstrakt

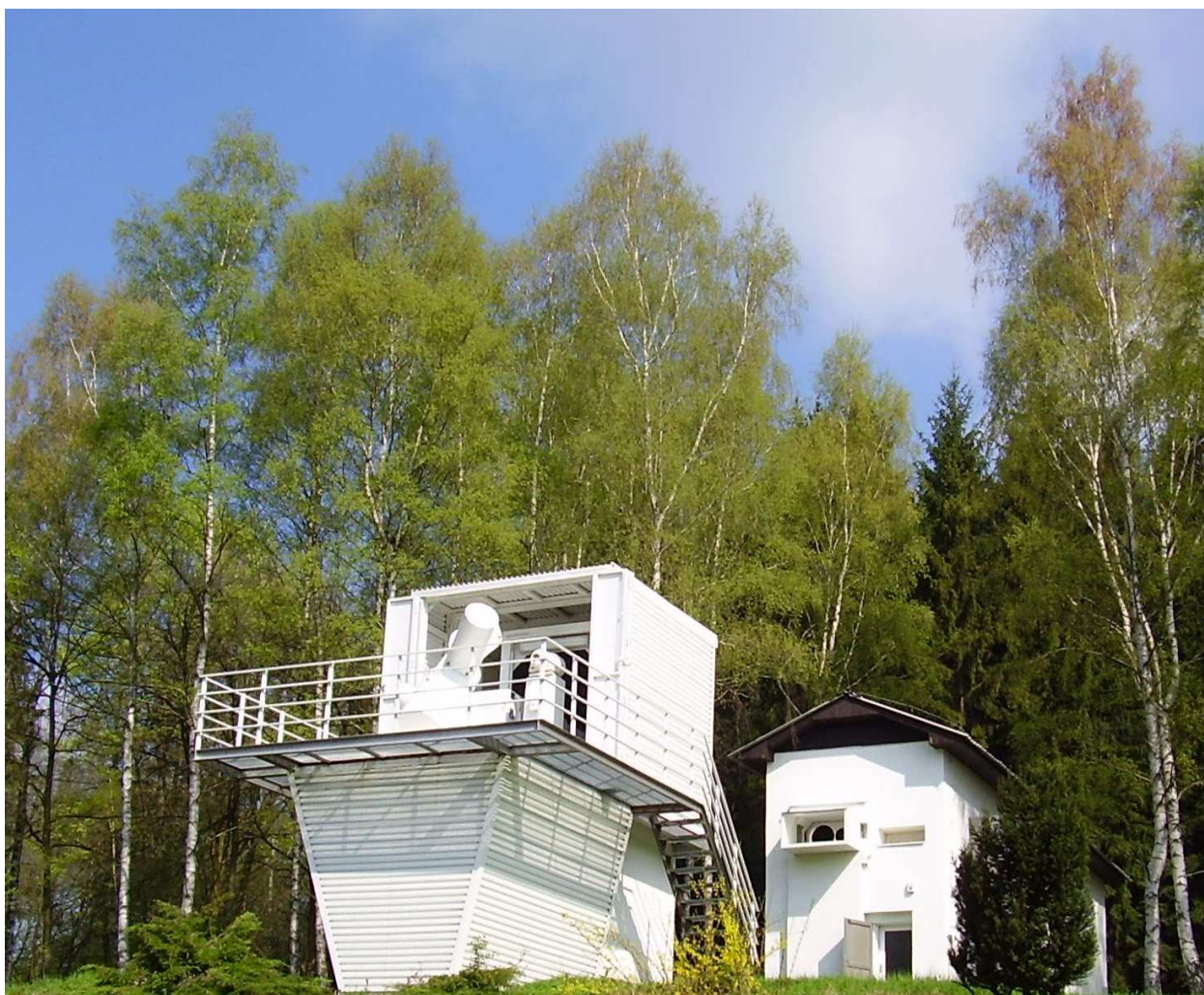
Oba dva ondřejovské spektrografy, postavené v 80. letech 20. století, byly v letech 2000 - 2004 modernizovány, zejména pokud jde o řídicí elektroniku. Přístroj HSFA2 byl původně koncipován jako klasický spektrograf Czerny - Turner s velkorozměrovými fotografickými detektory. S ohledem na jeho plánované vědecké využití pro potřeby současnosti a blízké budoucnosti byl HSFA2 přestavěn i po stránce optické. Difrakční mřížka i detektory byly vyměněny. Tento příspěvek stručně popisuje historii vzniku, zásady přestavby i hlavní parametry modernizovaného přístroje HSFA2 s důrazem na jeho přednosti mezi ostatními světově srovnatelnými přístroji. Uvádí též první výsledky pozorování a perspektivy do nejbližší budoucnosti.

1. ÚVOD

Počátek sluneční optické spektroskopie v Ondřejově lze datovat do 50. let 20. století. Tehdy se postupně vytvořilo několik směrů. Historicky nejstarší bylo pozorování slunečních erupcí spektrohelioskopem, který do Ondřejova převezl na začátku 2. světové války Dr. B. Šternberk ze Staré Dálý, dnešního Hurbanova. Později, počátkem padesátých let, byl tento spektrohelioskop nahrazen větším, na němž se prováděla patrolní pozorování erupcí a měřila se šířka emise v čáře $H\alpha$. Sluneční spektroskopii se tehdy věnovali Dr. Z. Blaha, Dr. Z. Švestka, Dr. V. Letfus, Dr. B. Růžičková - Topolová, Dr. B. Valníček, Dr. M. Kopecký a další. Dr. V. Bumba se začal věnovat studiu slunečního magnetického pole a jeho měření pomocí magnetografu. Všechny tyto aktivity vyústily i do budování přístrojového vybavení a zázemí. Tak byl postaven v polovině 50. let v nové budově slunečního oddělení v Ondřejově tzv. Mnohokamerový sluneční spektrograf. Tento přístroj umožňoval fotograficky zaznamenávat spektra slunečních erupcí a protuberancí v sedmi spektrálních oblastech od čáry $H\alpha$ až po $CaII$ K. Přístroj se vyznačoval relativně slušnou světelností 1:58 a tedy i krátkými expozičními dobami řádově desetin sekundy pro erupce několika sekund pro protuberance. V pozdějších letech byl tento spektrograf, hovorově zvaný laborka, postupně zdokonalován. Několikrát byla modernizována jeho

řídicí elektronika, byl vybaven systémem pro snímání obrazu ze štěrbin v čáře $H\alpha$, byly měněny detektory od fotografických desek na 35 mm film. Později, v 90. letech, byly použity i CCD video kamery s analogovým záznamem. To si vyžádalo i změnu optiky zobrazovacích kamer. Původní přístroj i tyto změny byly popsány např. v článkách Valníček et al. (1959), Kotrč et al. (1993), Kotrč (1997). Po stánci přístrojové se sluneční spektroskopie v Ondřejově rozvíjela i v dalších letech přes tzv. otáčivý sluneční spektrograf s magnetografem až po éru HSFA. Současně se zdokonalováním přístrojů se vyvíjelo i teoretické zázemí pro interpretaci a spekter a lepší úrovni z nich vyvozeného fyzikálního poznání.

V r. 1976 byla u východoněmecké firmy Carl Zeiss Jena na základě podpory Československé akademie věd objednána malá série horizontálních slunečních dalekohledů se spektrografy HSFA (název pochází z německého výrazu Horizontal-Sonnen-Forschungs-Anlage, t.j. horizontální zařízení pro výzkum Slunce). Tak byly v 80. letech 20. století na observatoři v Ondřejově instalovány dva horizontální sluneční dalekohledy se spektrografy HSFA1 a HSFA2. Třetí přístroj (HSFA3) se měl používat jako laboratorní a experimentální dalekohled a spektrograf v ondřejovské Kosmické laboratoři. Ten však byl po mnohých peripetiích nakonec v rámci dvoustranné spolupráce reexpedován do pohoří Tian Šan u Alma Aty na vysokohorskou stanici Šternbergova ústavu Moskevské státní univerzity. Když



Obr. 1. Celkový pohled na HSFA2 od jihu. Přístroj se nachází v nadmořské výšce 500 m v lesnaté oblasti v nové části observatoře. Vlevo je Jenschův coelostat ve výšce 4 - 6 m nad zemí, vpravo vzadu pavilon spektrografu.

byl konečně dostavěn, byl s celou vysokohorskou stanicí bez náhrady nacionalizován kazašskou vládou a o jeho dalším osudu nejsou žádné informace. Čtvrtý a pátý přístroj byly postaveny na slovenských pracovištích. HSFA4 byl instalován v podtatranské Staré Lesné v tehdy novém areálu Astronomického ústavu SAV. HSF5, který byl vždy považován za nejdokonalejší z celé malé série, protože byl dokončen jako poslední a všechny dětské nemoci starších exemplářů již u něj byly odstraněny, byl postaven v luxusním pavilónu Ústřední slovenské hvězdárny v Hurbanově. Koncepce všech HSFA byla vyvinuta na základě dlouholetých zkušeností s tzv. otáčivým spektrografem a magnetografem, který byl v Československu vyroben a na observatoři v Ondřejově uveden do provozu v průběhu 60. let 20. století. Tento předchůdce pozdějších HSFA byl koncipován na základě principu horizontálních spektrografů ACU5 vyráběných a používaných v tehdejších

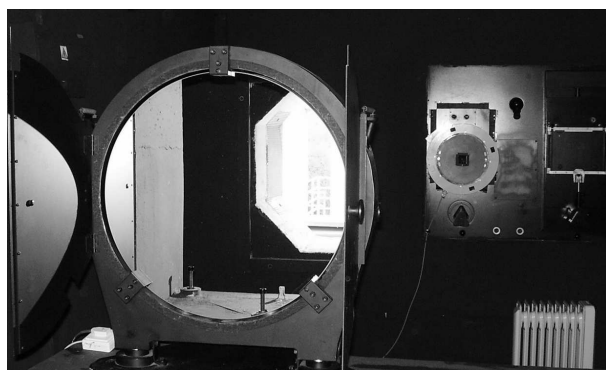
SSSR. Součásti ondřejovského spektrografu byly vyrobeny v československých strojírenských závodech (Škoda, ap.) a celý přístroj byl vybaven zčásti československou a zčásti sovětskou optikou z nízkoroztažného optického materiálu Sital. Elektronika byla převážně československé proveniencie. Přístroj sloužil hlavně jako fotoelektrický magnetograf, jehož elektronika a ovládací krystaly byly dodány ze sibiřského Irkutsku, SSSR. V omezeném rozsahu se používal i jako fotografický magnetograf, což Dr. P. Macákovi umožnilo detailně měřit velmi silná magnetická pole ve velkých skupinách slunečních skvrn. Možnost otáčet celým spektrografem (využívá se s výhodou ke skenování a snímání různě umístěných objektů na slunečním disku), se záhy ukázala jako zcela fiktivní a v praxi nevyužitelná. Jeho optická přesnost totiž o řád přesahovala mechanická rozladění, která při otáčení vznikala a vyžadovala opětvou náročnou justáž.



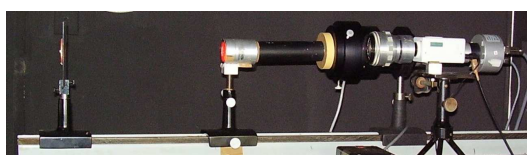
Obr. 2. Coelostat typu Jensch, průměr dvou plochých zrcadel je 60 cm. Coelostat je chráněn před nepřízní počasí odsuvnou plechovou střechou.

2. STAVBA HSFA2

Po dvaceti letech používání tento magnetograf i jeho napájecí dalekohled začaly zastarávat a tak bylo využito možnosti získat historicky první profesionálně vyvinutý a specializovanou firmou dodaný přístroj pro náročná sluneční spektrální pozorování na ondřejovské observatoři. Na jeho koncepci a specifikaci technického zadání se podíleli zejména Dr. V. Bumba a Ing. M. Klvaňa s řadou specialistů z firmy Carl Zeiss Jena. Později, když bylo definitivně rozhodnuto, ve které části observatoře se oba přístroje začnou stavět a stavba prováděná Průmstavem Kolín začala, ujal se všech prací souvisejících s návazností hrubé stavby a vlastní instalací přístrojové technologie Dr. P. Ambrož. Jak už bývá obvyklé, bylo v této náročné fázi nutno upravit a doladit mnohé požadavky s možnostmi. To vedlo ke zvýšení preciznosti provedení některých prací a zdokonalení použitých řešení. Přístroj nebyl v 90. letech příliš využíván, protože aktivita pozorování se v té době upínala na zahraniční přístroje, umístěných zejména na Kanárských ostrovech. Spíše se k pozorování optických spekter používal Mnohokamerový sluneční spektrograf v hlavní budově slunečního oddělení na staré ondřejovské observatoři. Přesto přístroj HSFA2 stárnul fyzicky i morálně.



Obr. 3. Hlavní zrcadlo horizontálního dalekohledu má průměr 50 cm a ohniskovou vzdálenost 35 m, tedy světelnost je 1:70. Napravo vidíme vstupní štěrbinu spektrografu.



Obr. 4. Detail systému snímání obrazu štěrbinu v čáře H α .

Aktivace výstupu z kamery

CONNECT

DISCONNECT

Ovládání dalekohledu
Souřadnice A: 9999999
Souřadnice B: 9999999
Března směřuje
Souřadnice poloh. stolku 1

RYCHLE

Pointace Přehledba Měření

Základní funkce O.K.

Amin2-zrcadla Amin3-mřížky

PANEL MĚŘENÍ

Aktuální nastavení spektrografu:

Vývoňová	Prvek	Řád	řř	Korekce	Pozice
0.00	0	0	0	0.00	

Aktuální nastavení měřicího režimu:

Režim měření: Vzorování bez pasivu
Režim vzorkování: Normální

Měřicí rychlost	Prodlouha	Delší	Posuv řádku
0.00	0.00	0.00	0.00

Nastavení kamer:

Kamera	Expozice	snímek/črtek	Režim
CCD 1	300.00	0.00	
CCD 2	0.00	0.00	
CCD 3	0.00	0.00	
CCD 4	0.00	0.00	
CCD 5	0.00	0.00	

Snímek Sekvence Připravit Vypni PC kamer

Sternu Spust měření OK

Systémové prostředky

ULOŽENÍ PROMĚNY
IZOLACE APLIKACE

Spektrograf

Úvedení do provozu
Ovládání spektrografu
Zveřejnění spektrografu

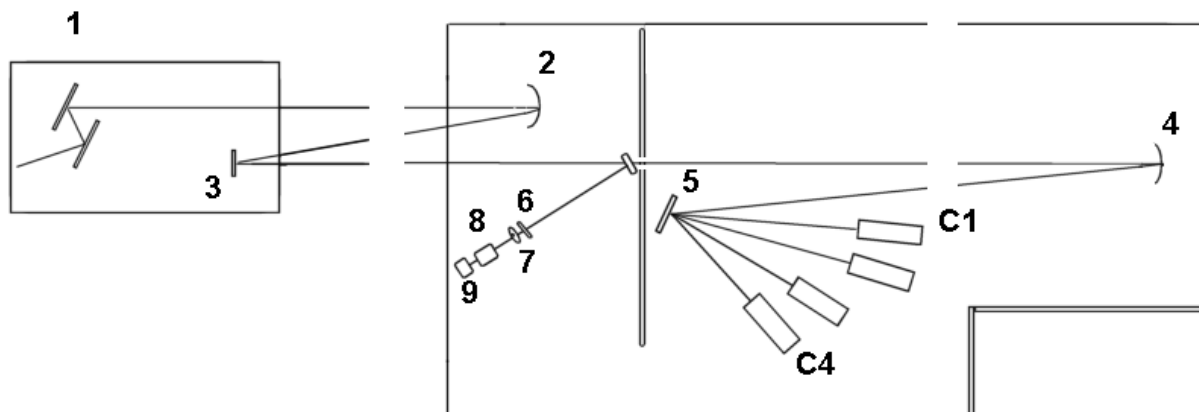
Režim pozorování

Amin4-polnice Amin5-coelostat

Obr. 5. Ovládací program hlavního serveru umožňuje přehledný přístup k informacím a řídicím prvkům.

3. MODERNIZACE HSFA2

Počátkem 21. století bylo rozhodnuto, že oba ondřejovské horizontální dalekohledy a spektrografy HSFA1 a HSFA2 budou modernizovány. Jejich původní řídicí elektronika, dodaná firmou Vilati z Budapešti, začala být poruchová a morálně zastaralá. Projekt byl realizován v rámci grantu Akademie věd České republiky na výstavbu nákladných přístrojů. Hlavním dodavatelem zakázky byla firma Space Devices z Prahy. Zadání požadavků na elektroniku a funkce modernizovaného přístroje vypracoval Ing. M. Klvaňa. Modernizace zahrnovala řídicí elektroniku



Obr. 6. Optické schéma horizontálního dalekohledu a spektrografu. 1 - zrcadla coelostatu, 2 - hlavní objektiv dalekohledu o průměru 50 cm a ohniskové vzdálenosti 35 m, 3 - ploché pomocné zrcadlo o průměru 25 cm, 4 - zrcadlo kolimátoru o průměru 25 cm a ohniskové vzdálenosti 10 m, 5 - difrakční mřížka. Systém snímání obrazu ze štěrbin: 6 - hradicí filtr, 7 - zobrazovací objektiv, 8 - úzkopásmový $H\alpha$ filtr, 9 - CCD kamera.

dalekohledu a spektrografu (Klvaňa et al., 2001). Kamerový systém byl navržen a zakoupen přímo od výrobce Vosskuehler a jeho implementace do systému ovládání spektrografu byla realizována firmou Space Devices. Další uzpůsobení a využití elektroniky bylo prováděno pracovníky Astronomického ústavu a studenty magisterského i doktorského studia.

Současně s dokončením modernizace elektroniky započaly práce na uzpůsobení optických částí spektrografu požadavkům kladeným dosaženou úrovní vědeckého poznání a stavem techniky. V porovnání s dosud užívaným Mnohokamerovým slunečním spektrografem (Kotrč, 1997), měl HSFA2 řadu předností a také některé slabší stránky. Pokud jde o výhody, jde o jednoznačně profesionálně vyvinutý a vyrobený přístroj s dokonalejší optikou, navíc umístěný v lokalitě s lepším seeingem a nízkou úrovní rušení okolním prostředím. Ke slabším stránkám se nechá počítat jen velmi omezená šířka místnosti spektrografu a náročnější ovládání a pohon coelostatu hydraulickým čerpadlem, které snižuje použitelnost při velmi nízkých venkovních teplotách.

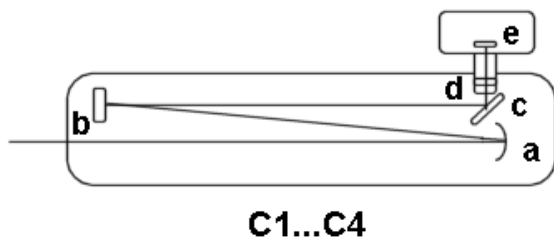
Záměrem přestavby optiky spektrografu bylo docílit simultánní pozorování na prvcích CCD v několika diagnosticky významných spektrálních řadách, při nejlepším možném spektrálním rozlišení, a s maximálním možným rozlišením časovým. Vycházeli jsme z omezené šířky místnosti spektrografu. Proto jsme provedli optimalizační výpočty zobrazovací optiky CCD kamer pro různé varianty konfigurace stávající i případně jiné difrakční mřížky (Kotrč & Kschioneck, 2003). Navrhli jsme optické a mechanické schéma a později jsme je i realizovali. Použité spektrální čáry byly vybrány s ohledem na jejich významnost ve spektrální diagnostice a na je-

jich rozmístění a možnosti detekce ve spektrografu takto: $H\alpha$ (6563 Å), D3 (5875 Å), $H\beta$ (4861 Å), CaII K resp. CaII H (3934 resp. 3968 Å).

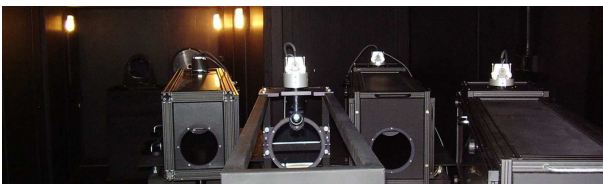
Dosaženým výsledkem je přestavba HSFA2 spektrografu z typu Czerny - Turner na mnohokamerový. Místo jednoho velkoplošného fotografického detektoru má nyní spektrograf 5 CCD kamer. Z toho 4 přímo v polohách snímáných čar. Pátá CCD kamera je instalována na nově vybudovaném systému snímání obrazu štěrbin. Původní difrakční mřížka Bausch & Lomb, $C = 632.1\text{mm}^{-1}$, šířka $W=206$ mm, výška $H=154$ mm, úhel natočení $\varphi = 51^\circ$, s maximem směřovaným do 4. difrakčního řádu byla nahrazena mřížkou Richardson, $C = 1200\text{mm}^{-1}$, se šířkou $W=206$ mm, výškou $H=154$ mm, úhlem blazování $\varphi = 17.5^\circ$, s maximem světla v 1. difrakčním řádu. Optimalizace rozmístění CCD kamer a jejich optických zobrazovacích systémů byla udělána s ohledem na malé rozměry čipů CCD detektorů, omezený prostor místnosti spektrografu a dosažení co nejvyššího prostorového a spektrálního rozlišení. Použité CCD kamery VDS Vosskuehler CCD-1300LN, mají rozměr pixelu $6.7\mu \times 6.7\mu$, rozměr čipu $s = pH \times pV = 1280(H) \times 1024(V)$ pixelů, jsou kombinovány s grabberem Matrix Vision. Jsou dvanáctibitové a na každou kameru a grabber připadá jeden řídicí PC. Všechna PC jsou pak spojena do sítě a ovládána řídicím počítačem spektrografu. Je využito celé rozlišení čipu 1280×1024 pixelů, kamera pracuje s asynchronní nebo i synchronní závěrkou s rozsahem $1/10\,000$ s až 10 s, načítací šum $\leq 14e$, saturace senzoru nastává při $> 25000e$, grabber má digitální 12-ti bitový výstup na RS-644, kvantová účinnost čipu dosahuje až 50 % a použitelný dynamický rozsah je 1 : 2000.



Obr. 7. Na rozdíl od uspořádání pracoviště před rekonstrukcí, kdy pozorovatel ovládal spektrograf z blízkosti šterbiny, nyní je dislokován v suterénu pavilónu, kde má k dispozici všechny ovládací elementy a potřebný pracovní komfort.

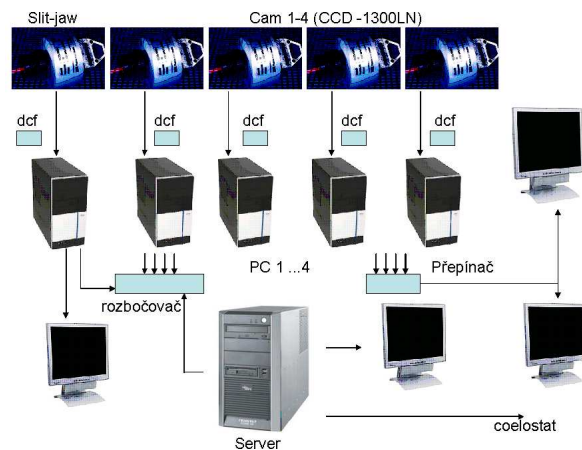


Obr. 8. Zobrazovací systémy jednotlivých CCD kamer ve spektrografu C1 ... C4: a - hlavní objektiv, b - ploché zrcadlo, c - eliptické ploché zrcátko, d - destička korigující astigmatismus a kómu, e - CCD kamera.



Obr. 9. Zobrazovací objektivy jednotlivých spektrálních kamer. Otevřenou konstrukcí je vidět hlavní zobrazovací objektiv, vpravo nahoře jsou dva exempláře CCD kamer Vosskuehler.

Pro účely rychlé orientace na disku je snímán celý sluneční disk, nebo jeho podstatná část na malém dalekohledu PST od firmy Coronado. Pozorovatel má na svém dislokovaném pracovišti k dispozici i



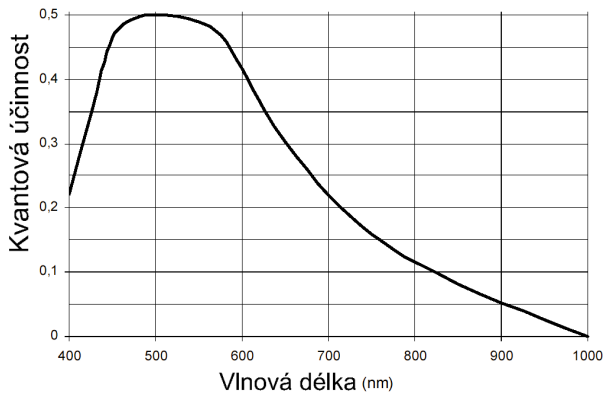
Obr. 10. Diagram ukazující propojení CCD kamer, časového signálu a dalších technických detailů spektrografu.

video přenos z okolí primárního ohniska dalekohledu, což mu poskytuje dodatečné informace k rychlejší reakcím.

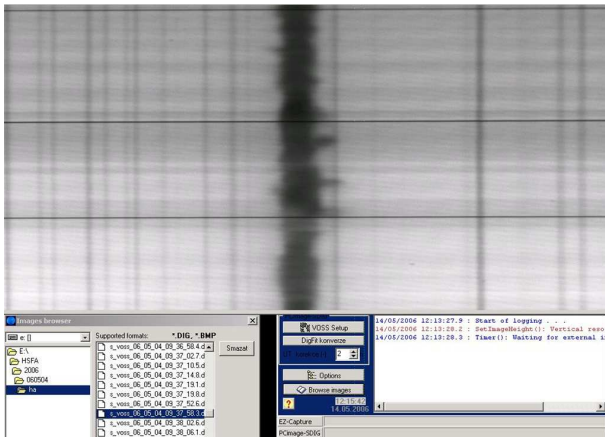
Pro přesnou kalibraci snímků je vytvořen program pro odstranění temného snímku (dark frame) a flat-fieldu. Na dalších obrázcích spekter vidíme dvojice snímků před a po této části kalibrace.

4. ZHODNOCENÍ A VÝHLEDY HSFA2

Porovnáme-li snímky pořizované Mnohokamerovým spektrografem se snímky spekter



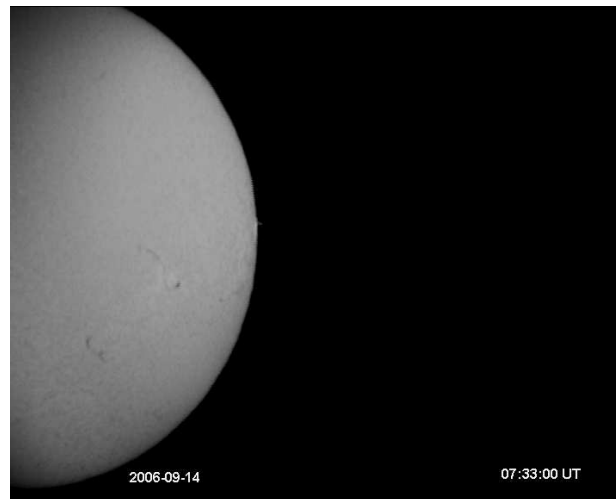
Obr. 11. Kvantová účinnost čipu použitých CCD kamer Vosskuehler 1300LN v závislosti na vlnové délce zachyceného záření. Účinnost je v vyjádřena v procentech.



Obr. 12. Diagram kombinace snímků monitoru při záznamu spektra. Obsluha vidí kvalitu spektrogramu (v tomto případě $H\alpha$), ve spodní části je informace o ukládání souborů.

z HSFA2, vidíme podstatné zlepšení téměř ve všech oblastech, zejména pokud jde o kvalitu prostorového a spektrálního rozlišení. Zvýšila se téměř desetkrát též dynamická hloubka signálu z osmi na dvanáct bitů. Pokud jde o časové rozlišení, to je nižší, ale kadencí do pěti snímků spektra za sekundu při vysokém spektrálním rozlišení je stále na prvních místech v celosvětovém srovnání. Obrovskou výhodou dalekohledu a spektrografu je nadále jeho neustálá připravenost snímat ve vybraných spektrálních čarách kdykoliv to vědecký zájem vyžaduje. Značnou předností je též snížení úrovně rozptýleného světla a zavedení simultánního snímání slit-jaw obrázků situace na šterbině v čáře $H\alpha$ i okolí primárního ohniska v bílém světle.

Porovnáme-li spektra získaná na HSFA2 z počátků zkušebního provozu se snímky dnešními, vidíme i zde značný pokrok. Viz archiv dat na



Obr. 13. Snímek poloviny slunečního disku ze 14. 9. 2006 v 07:09:14 UT $H\alpha$ interferenční filtr Coronado.

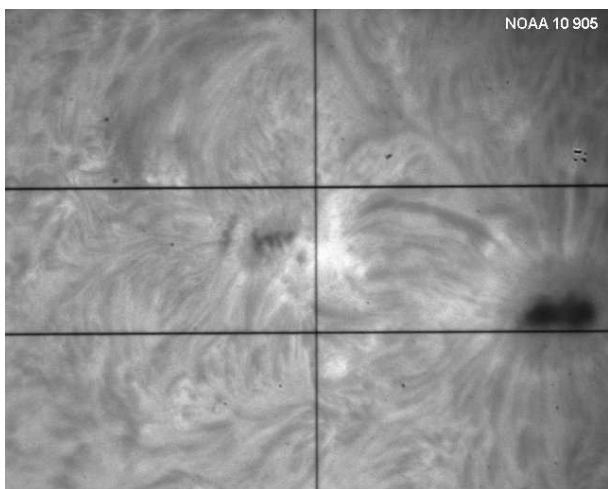
<http://www.asu.cas.cz/~pkotrc/index5.html>, (archiv dat - HSFA2), kde je také možné vidět příklady denních pozorování a požádat autory tohoto příspěvku, kteří jsou za spektrograf a pozorování zodpovědní, o podrobnější popis dat, případně o jejich zaslání ke zpracování. Pokud jde o výhledy do nejbližší budoucnosti, chceme se zaměřit na zlepšení kvality optického systému, odstranění některých aberací, dále na automatizaci kalibrace a archivace získaných dat. Chceme být rovněž důstojnými partnery pro mezinárodní pozorovací kampaně a to i pokud jde o podpůrná pozorování např. pro kosmické sondy jako Hinode ap. A samozřejmě používat získaná kvalitní data ke srovnání s existujícími modely a dosažení lepšího poznání fyzikálních jevů na Slunci. Hlavní uplatnění HSFA2 ve sluneční fyzice vidíme v pořizování dlouhých sérií spektrogramů vybraných jevů sluneční aktivity. Tedy studiu procesů, kde je možné očekávat i v optickém spektru velmi dynamické projevy, detekovatelné při vysokém časovém a slušném spektrálním rozlišení, tedy hlavních technických předností HSFA2 v porovnání s ostatními světovými slunečními spektrografy.

Poděkování

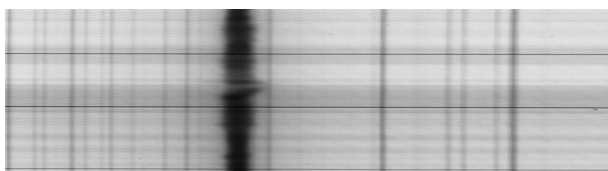
Tato práce byla umožněna díky grantům A3003203 a AV0Z10030501 AV ČR, a dále projektu č. 95 Česko-Slovenské spolupráce. Ju. A. K. děkuje AsÚ AV ČR za možnost opakovaně se účastnit pozorování a systematické práce na HSFA2.

LITERATURA

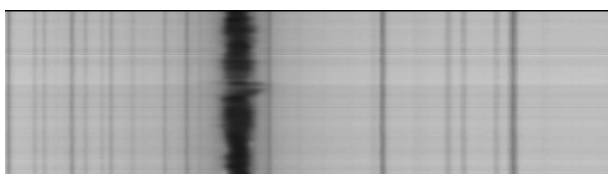
Klvaňa M., Sobotka M., Kotrč P., Knížek M., Heinzel P.: 2001, *Astronomische Nachrichten*, Vol. 322, p. 371-374.



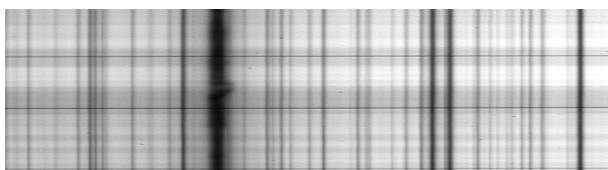
Obr. 14. Snímek aktivní oblasti NOAA 10 905 z 24. 8. 2006 v 08:10:06 UT přes $H\alpha$ interferenční filtr Coronado.



Obr. 15. $H\alpha$ spektrum AO před odečtením flat fieldu.

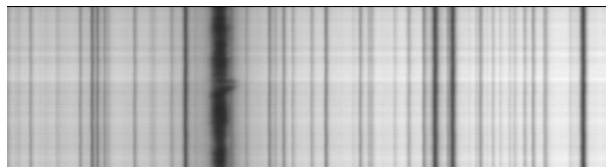


Obr. 16. Stejně $H\alpha$ spektrum AO jako na předchozím obrázku ale po odečtení flat fieldu.

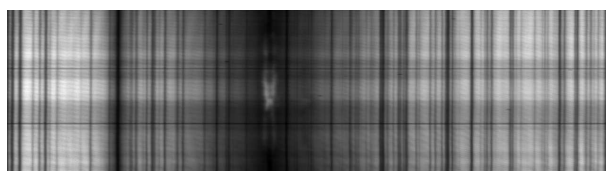


Obr. 17. $H\beta$ spektrum AO před odečtením flat fieldu.

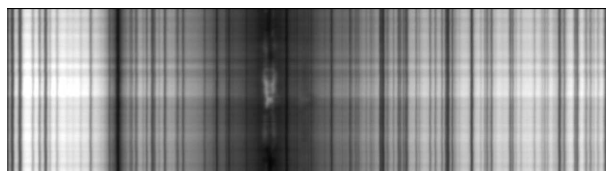
Kotrč, P., Heinzel, P. a Knížek M.: 1993, JOSO Annual Report 1992, ed. A. v. Alvensleben, 114.
 Kotrč P.: 1997; Hvar Obs. Bull., Vol. 21, p. 97-108.
 Kotrč P., Kschioneck K.: 2003; ESA SP-535, A. Wilson (ed.), p. 717-722.
 Valníček, B., Letfus, V., Blaha, M., Švestka Z., a Seidl Z.: 1959, Bull. Astron. Inst. Czechosl. 10, 149.



Obr. 18. Stejně $H\beta$ spektrum AO po odečtení flat fieldu.



Obr. 19. CaII H spektrum AO před odečtením flat fieldu.



Obr. 20. Stejně CaII H spektrum AO po odečtení flat fieldu.



Obr. 21. Přirozené sluneční spektrum - duha - nad spektrografem je snad příslibem dobré budoucnosti HSFA2.